



**Henrique José Lousa Costa**

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

## **Soldadura por Fricção Linear Assistida por Corrente Elétrica**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica

Orientador: Telmo Jorge Gomes dos Santos, Professor  
Doutor, FCT- UNL



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Março 2013**



---

Soldadura por Fricção Linear Assistida por Corrente Elétrica

© Henrique José Lousa Costa, FCT-UNL, 2013

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



---

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho. Em especial:

Ao meu orientador, Professor Doutor Telmo Santos, agradeço a partilha de conhecimentos e a constante ajuda ao longo da realização deste trabalho, assim como as críticas, correções e sugestões feitas durante todo o trabalho.

Um obrigado a todos os Professores do Núcleo de Tecnologia Industrial, pelo interesse demonstrado e pelas ajudas na realização deste trabalho.

Ao Mestre João Gonzalez pela transmissão de conhecimentos essenciais à conceção e desenvolvimento de diversos componentes do trabalho.

Aos técnicos das oficinas do DEMI da FCT, Sr. António Campos e Sr. Paulo Magalhães pelos ensinamentos e ajuda prestada nas diversas operações realizadas.

À minha família, especialmente aos meus pais por tudo o que me proporcionaram, e cujo apoio foi essencial para alcançar os meus objetivos.

Aos meus amigos, pela ajuda, companhia e apoio durante todos os momentos de trabalho e de lazer em que eu estive a realizar esta tese de mestrado.



---

## RESUMO

Um obstáculo à maior transferência industrial do processo de Soldadura por Fricção Linear (SFL) são os defeitos nas juntas soldadas. Os defeitos na raiz são os mais significativos, designadamente, a falta de penetração e o alinhamento de óxidos, ambos consequência do deficiente fluxo visco plástico de material na extremidade inferior do pino da ferramenta. Estes defeitos são os mais importantes porque são os mais difíceis de evitar e os mais difíceis de detetar. Contudo, a sua existência reduz drasticamente a resistência mecânica das juntas soldadas, sobretudo sob esforços de fadiga.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver e testar uma nova variante do processo de SFL, tendo em vista reduzir ou eliminar os defeitos na raiz. A variante proposta consiste em adicionar externamente uma fonte de energia suplementar na raiz da soldadura para aumentar o fluxo visco plástico de material nessa zona. Propôs-se a geração de calor por efeito de Joule, fazendo passar uma corrente elétrica de elevada intensidade para facilitar a deformação plástica do material.

Foi produzido um protótipo funcional, envolvendo ferramentas e acessórios de SFL dedicados, instrumentação e *software*. Foram desenvolvidos modelos analíticos e numéricos para simulação do processo, e foram realizadas várias soldaduras na liga AA6082-T6 para validação da metodologia.

As simulações confirmam a validade do conceito para intensidades de corrente elétrica da ordem de 800 A, e o protótipo cumpriu os requisitos inicialmente estabelecidos. Contudo, os resultados da análise metalográfica apenas revelaram uma redução significativa dos defeitos em um dos ensaios. Os resultados das medições de microdureza e de mapeamento de condutividade elétrica não evidenciaram alterações metalúrgicas devido ao efeito de Joule. Este trabalho permitiu estabelecer um importante conhecimento processual nesta variante da SFL, bem como identificar as futuras medidas corretivas, tendo em vista a melhoria dos resultados.

## PALAVRAS-CHAVE

Soldadura por Fricção Linear (SFL)

Defeitos na Raiz

Corrente Elétrica





---

## **ABSTRACT**

A major obstacle to industrial transfer of Friction Stir Welding (FSW) are the defects in the weld joints. Root defects are the most significant, particularly the lack of penetration and the oxid alignment, both a consequence of deficient visco plastic flow of material at the lower end of the pin tool. This defects are the most important because they are the most difficult to avoid and harder to detect. However, their presence greatly reduces the strenght of the weld joints, particularly under fatigue loading.

The aim of this project was to develop and test a new variant of FSW process in order to reduce or eliminate the root defects. The proposed modification is to add an additional external source of energy in the weld root to increase the visco plastic flow of material in that area. It was proposed the generation of heat by joule effect by passing an hight intensity electrical current in order to facilitate the plastic deformation of the material.

New prototypes of FSW tool and accessories, instrumentation and software were produced. Analytical and numerical models were developed for simulating the process, and several welds were made in AA6082-T6 for validation of the methodology.

The simulations confirm the validity of the concept for electric current intensities on the order of 800 A, and the prototypes has met the requirements initially established. However, the results of metallographic analysis only revealed a significant reduction of defects in one test. The results of Hardness and electrical conductivity mapping showed no metallurgical changes due to the joule effect. This work has established an important procedural in this FSW variant, as well as identify future corrective measures in order to improve results.

## **Key-Words**

Friction Stir Welding (FSW)

Root Defects

Electric Current



# ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	V
RESUMO .....	VII
ABSTRACT.....	IX
ÍNDICE .....	XI
LISTA DE FIGURAS .....	XV
LISTA DE TABELAS .....	XIX
NOMENCLATURA .....	XXI
Nomenclatura Romana.....	XXI
Nomenclatura Grega .....	XXI
Siglas .....	XXIII
1 Introdução .....	1
1.1 Enquadramento e Motivação.....	1
1.2 Resumo Alargado.....	2
1.2.1 Objetivos Tecnológicos e Científicos.....	2
1.2.2 Trabalho Realizado .....	3
1.3 Estrutura da Dissertação.....	3
2 Revisão do Estado da Arte .....	5
2.1 Introdução .....	5
2.2 Soldadura por Fricção Linear.....	5
2.2.1 O Processo.....	5
2.2.2 Ferramentas de SFL .....	7
2.2.3 Defeitos Típicos .....	9
2.3 Defeitos na Raiz do Cordão .....	11
2.4 Solução para os Defeitos na Raiz.....	13
2.5 Processos Assistidos por Corrente Elétrica.....	15
2.6 Síntese do Capítulo.....	17
3 Metodologias para a Eliminação dos Defeitos na Raiz.....	19
3.1 Introdução .....	19
3.2 Tentativas Preliminares de Eliminação do Defeito .....	19
3.3 Conceito de SFLAE .....	21
3.4 Simulação Analítica .....	21
3.5 Simulação Numérica .....	25

3.6	Síntese do Capítulo.....	28
4	Desenvolvimento do Protótipo Funcional.....	29
4.1	Introdução .....	29
4.2	Ferramenta de SFL.....	29
4.2.1	Pino e <i>Shoulder</i> .....	29
4.2.2	Ferramenta SFLAE_v1 .....	31
4.2.3	Ferramenta SFLAE_v2 .....	32
4.2.4	Ferramenta SFLAE_v3 .....	34
4.3	Base.....	35
4.4	Sistema de Alimentação da Ferramenta .....	37
4.4.1	Sistema de escovas .....	37
4.4.2	Sistema de Ligação Direto .....	38
4.5	Sistema de Aquisição de Dados .....	39
4.5.1	Sensor Amperimétrico.....	39
4.5.2	Software .....	41
4.6	Montagem Experimental .....	42
4.7	Síntese do Capítulo.....	45
5	Procedimento Experimental .....	47
5.1	Introdução .....	47
5.2	Caracterização do Material Base.....	47
5.3	Equipamento Utilizado.....	47
5.4	Parâmetros dos Ensaios Experimentais.....	48
5.4.1	Ensaios Preliminares com Material de Sacrifício.....	48
5.4.2	Ensaios de SFLAE .....	50
5.5	Análise Metalográfica .....	52
5.6	Ensaios de Dureza .....	53
5.7	Ensaios de Medição de Condutividade Elétrica .....	54
5.8	Síntese do Capítulo.....	56
6	Resultados e Discussão .....	57
6.1	Introdução .....	57
6.2	Ensaios Preliminares com Material de Sacrifício.....	57
6.3	Ensaios de SFLAE .....	62
6.3.1	Inspeção Visual .....	62
6.3.2	Análise Metalográfica .....	69
6.3.3	Ensaios de Dureza .....	77
6.3.4	Ensaios de Medição de Condutividade Elétrica .....	78

6.4	Síntese do Capítulo.....	84
7	Conclusões e Desenvolvimentos Futuros.....	85
7.1	Conclusões .....	85
7.2	Desenvolvimentos Futuros.....	86
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	87
	ANEXOS: .....	I
	A1-Transdutor Amperimétrico LEM LA 200-P/SP1 .....	II
	A2-Transdutor Amperimétrico LEM LF 1005-S .....	III
	A3-Transdutor Amperimétrico LEM HTA 400-s .....	IV
	A4- Código LabVIEW2012 .....	VI
	A4.1- Diagrama de Blocos .....	VI
	A4.2- Dados Gerados .....	VI
	A5- Resultados dos Ensaios de Dureza.....	VII



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1- Exemplos de aplicação da SFL. -----	1
Figura 2.1- Ferramenta de SFL, <i>i-StirTool_v2</i> -----	6
Figura 2.2- Juntas possíveis no processo de SFL [2].-----	6
Figura 2.3- Representação esquemática do processo de SFL, adaptado de [4].-----	7
Figura 2.4- Ferramentas não convencionais de SFL, adaptado de [17]-----	8
Figura 2.5- SFL apresentando o defeito de rebarba [20] -----	10
Figura 2.6- Vazio originado por uma velocidade de 400mm/min [9].-----	10
Figura 2.7- <i>Wormhole</i> superficial [20]-----	11
Figura 2.9- Macrografias de vários defeitos na raiz -----	12
Figura 2.8- Representação esquemática dos defeitos na raiz -----	12
Figura 2.10- Ferramenta <i>Bobbin Tool</i> patenteada pelo TWI [28] -----	13
Figura 2.11- <i>Bobbin Tool</i> , vertente fixa e flutuante -----	14
Figura 2.12- Aparato utilizado nos ensaios[32]. -----	15
Figura 2.13- Profundidade do canal em relação a força aplicada [32]-----	16
Figura 2.14- Comparação entre a força necessária para o processo com e sem corrente elétrica [33]-----	16
Figura 3.1- Representação esquemática da montagem I-----	19
Figura 3.2- Representação esquemática da montagem II-----	20
Figura 3.3- Representação esquemática da montagem III-----	20
Figura 3.4- Modelação em <i>solidworks</i> da ferramenta assistida por corrente elétrica. -----	21
Figura 3.5- Esquema representativo do modelo-----	22
Figura 3.6- Gráfico do aumento da temperatura em função da corrente para diferentes materiais -----	25
Figura 3.7- Modelo geométrico criado para a simulação-----	26
Figura 3.8- Elementos de malha do modelo geométrico -----	26
Figura 3.9- Ilustração representativa da densidade de corrente -----	27
Figura 3.10- Representação do fluxo de corrente-----	27
Figura 3.11- Vista em pormenor da passagem de corrente pelos elementos de cobre-----	28
Figura 4.1- Pino e <i>Shoulder</i> -----	30
Figura 4.2- Protótipo produzido do pino e do <i>shoulder</i> -----	30
Figura 4.3- Ferramenta SFLAE_v1-----	31
Figura 4.4- Protótipo da ferramenta SFLAE_v1 -----	32
Figura 4.5- Ferramenta SFLAE_v2-----	33
Figura 4.6- Protótipo da ferramenta SFLAE_v2 -----	33
Figura 4.7- Ferramenta SFLAE_v3-----	35
Figura 4.8- Protótipo produzido da ferramenta SFLAE_v3 -----	35
Figura 4.9- Base de suporte. -----	36
Figura 4.10- Protótipo da base de suporte-----	37
Figura 4.11- Sistema de escovas. -----	37
Figura 4.12- Protótipo do suporte das escovas -----	38
Figura 4.13- Chapas de ligação-----	39
Figura 4.14- Sensor Amperimétrico_v1. -----	40
Figura 4.15- Sensor amperimétrico_v2 -----	41

Figura 4.16- Painel frontal do programa de aquisição de dados com os diferentes campos assinalados-----	42
Figura 4.17- Esquema geral da montagem-----	43
Figura 4.18- Sistema de aquisição de dados-----	43
Figura 4.19- Montagem experimental da montagem I-----	44
Figura 4.20- Montagem experimental II e III-----	44
Figura 4.21- Sistema de fixação das chapas a soldar-----	45
Figura 5.1- Fresadora convencional utilizada nos ensaios.-----	48
Figura 5.2- Montagem experimental-----	49
Figura 5.3- Base de encastramento dos materiais de sacrifício,-----	50
Figura 5.4- Critério utilizado para medir a altura do pino-----	51
Figura 5.5- Microscópio ótico Olympus CX40RF200e fonte de iluminação Olympus TH3.----	52
Figura 5.6- Micro durometro Mitotoyo HM-112-----	53
Figura 5.7- Aparato laboratorial-----	54
Figura 5.8- Mesa Delta e <i>Pencil Probe</i> -----	55
Figura 6.1- Resultado obtido no ensaio #1-----	57
Figura 6.2- Resultados obtidos nos ensaios #2 e #3-----	58
Figura 6.3- Resultado obtido no ensaio #6-----	59
Figura 6.4- Macrografia da secção transversal da amostra do ensaio #4-----	59
Figura 6.5- Macrografia da secção transversal da amostra do ensaio #5-----	60
Figura 6.6- Macrografia da secção transversal da amostra do ensaio #9-----	61
Figura 6.7- Macrografia da secção transversal da amostra do ensaio #10-----	61
Figura 6.8- Macrografias da secção transversal das amostras dos ensaios #6 e #7-----	61
Figura 6.9- Resultado de ensaio #1.-----	62
Figura 6.10- Resultado do ensaio #2.-----	62
Figura 6.11- Soldadura resultante do ensaio #3 e respetivos gráficos de corrente e diferença de potencial-----	63
Figura 6.12- Soldadura resultante do ensaio #4 e respetivos gráficos de corrente e diferença de potencial-----	64
Figura 6.13- Soldadura resultante do ensaio #5, respetivos gráficos de corrente e diferença de potencial e gráfico com os valores das temperaturas obtidas em cada termopar-----	65
Figura 6.14- Soldadura resultante do ensaio #6, respetivos gráficos de corrente e diferença de potencial e gráfico com os valores das temperaturas obtidas em cada termopar-----	66
Figura 6.15- Soldadura resultante do ensaio #7, respetivos gráficos de corrente e diferença de potencial e gráfico com os valores das temperaturas obtidas em cada termopar-----	67
Figura 6.16- Anilhas isolantes-----	68
Figura 6.17- Efeito do processo na alma do pino-----	68
Figura 6.18- Macrografias da secção transversal das amostras do ensaio #3-----	69
Figura 6.19- Macrografias da secção transversal das amostras do ensaio #3-----	70
Figura 6.20- Macrografias da secção transversal das amostras do ensaio #4-----	72
Figura 6.21- Macrografia da secção transversal da amostra M6 do ensaio #4-----	72
Figura 6.22- Macrografias da secção transversal das amostras do ensaio #5-----	73
Figura 6.23- Macrografia da secção transversal da amostra M1 do ensaio #6-----	74
Figura 6.24- Macrografias da secção transversal das amostras do ensaio #6-----	74
Figura 6.25- Macrografias da secção transversal das amostras do ensaio #7-----	75
Figura 6.26- Macrografias da secção transversal das amostras do ensaio #7-----	76
Figura 6.27- Perfis de dureza do cordão do ensaio #3 M2-----	77
Figura 6.28- Sobreposição dos perfis de dureza das amostras M2, M3, M4 e M5 do ensaio #3 78	



Figura 6.29- Perfil de condutividade da amostra M2 do ensaio #3-----	79
Figura 6.30- Perfil de condutividade da amostra M1 do ensaio #4-----	79
Figura 6.31- Sobreposição dos perfis de condutividade da amostra M1 e M2 do ensaio #4 ----	80
Figura 6.32- Sobreposição dos perfis de condutividade da amostra M1 e M2 do ensaio #4 ----	80
Figura 6.33- Sobreposição dos perfis de condutividade da amostra M2 e M3 do ensaio #6 ----	81
Figura 6.34- Perfil de condutividade da amostra M2 do ensaio #6-----	82
Figura 6.35- Perfil de condutividade da amostra M3 do ensaio #6-----	82
Figura 6.36- Sobreposição dos perfis de condutividade da amostra M2 e M3 do ensaio #7 ----	83
Figura 6.37- Sobreposição dos perfis de condutividade da amostra M2 e M3 do ensaio #7 ----	83
Figura A.1- Esquema de ligações elétricas do Transdutor LEM LA - 200P/ SP1-----	III
Figura A.2- Esquema de ligações elétricas do Transdutor LEM LF 1005-s-----	IV
Figura A.3- Esquema de ligações elétricas do Transdutor LEM HTA 400-s-----	V
Figura A.4- Diagrama de blocos do código Labview do programa de aquisição de dados-----	VI
Figura A.5- Parte do ficheiro *.txt gerado pelo Software de aquisição de dados-----	VI
Figura A.6- Perfil de dureza do cordão de soldadura da amostra M3 do ensaio #3 -----	VII
Figura A.7- Perfil de dureza do cordão de soldadura da amostra M4 do ensaio #3 -----	VII
Figura A.8- Perfil de dureza do cordão de soldadura da amostra M5 do ensaio #3 -----	VII
Figura A.9- Perfil de dureza do cordão de soldadura da amostra M1 do ensaio #4 -----	VIII
Figura A.10- Perfil de dureza do cordão de soldadura da amostra M2 do ensaio #4-----	VIII
Figura A.11- Sobreposição dos perfis de dureza das amostras M1 e M2 do ensaio #4 -----	VIII
Figura A.12- Perfil de dureza do cordão de soldadura da amostra M2 do ensaio #6-----	IX
Figura A.13- Perfil de dureza do cordão de soldadura da amostra M3 do ensaio #6-----	IX
Figura A.14- Sobreposição dos perfis de dureza das amostras M2 e M3 do ensaio #6 -----	IX
Figura A.15- Perfil de dureza do cordão de soldadura da amostra M2 do ensaio #7-----	X
Figura A.16- Perfil de dureza do cordão de soldadura da amostra M3 do ensaio #7-----	X
Figura A.17- Sobreposição dos perfis de dureza das amostras M2 e M3 do ensaio #7 -----	X



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Terminologia adotada. ....	12
Tabela 3.1- Parâmetros.....	22
Tabela 3.2- Propriedades dos materiais [36] .....	24
Tabela 3.3- Parâmetros a utilizar e temperaturas obtidas.....	25
Tabela 5.1- Composição química da liga AA 6082-T6 (% em peso) [36].....	47
Tabela 5.2- Parâmetros dos Ensaios realizados nas vertentes preliminares. ....	49
Tabela 5.3- Parâmetros dos ensaios realizados na SFLAE .....	51
Tabela 5.4- Parâmetros de teste utilizados nos ensaios com a sonda <i>Pencil Probe</i> .....	55
Tabela A.1- Especificações elétrica do transdutor amperimétrico LEM LA 200P/SP1 .....	II
Tabela A.2- Especificações elétrica do transdutor amperimétrico LEM LF 1005-s.....	IV
Tabela A.3- Especificações elétricas do transdutor amperimétrico LEM HTA 400-s.....	V



## NOMENCLATURA

### Nomenclatura Romana

V      Velocidade de avanço linear da ferramenta SFL [ $m \cdot s^{-1}$ ]

$L_{pino}$     Comprimento saliente do pino da ferramenta de SFL [m]

### Nomenclatura Grega

$\varnothing$       Diâmetro [m]

$\pi$       Pi (quociente entre o perímetro e o diâmetro de uma circunferência:  $\pi = 3.1415$ )  
[ $m \cdot m^{-1}$ ]

$\rho$       Densidade [ $Kg \cdot m^{-3}$ ]

$\Omega$       Velocidade de rotação da ferramenta de SFL [ver/min]

$\sigma$       Condutividade elétrica [%IACS]



## Siglas

AA	<i>Aluminium alloy</i>
BoP	<i>Bead on Plate</i>
DEMI	Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial
GUI	<i>Graphical User Interfaces</i>
LA	Lado em Avanço
LOP	<i>Lack of Penetration</i>
LR	Lado em Retrocesso
MB	Material Base
NTI	Núcleo de Tecnologia Industrial
SFL	Soldadura por Fricção Linear
SFLAE	Soldadura por Fricção Linear Assistida por corrente elétrica
ZAC	Zona Afetada pelo calor
ZATM	Zona Afetada Termo-Mecanicamente
TWI	<i>The Welding Institute</i>





# 1 Introdução

## 1.1 Enquadramento e Motivação

Em 1991 a soldadura por fricção linear (SFL) foi desenvolvida pelo The Welding Institute (TWI) [1]. Este novo conceito de soldadura constituiu um enorme desenvolvimento a nível industrial, uma vez que permite soldar materiais de baixa soldabilidade que anteriormente eram praticamente impossíveis de ligar recorrendo à soldadura por fusão, nomeadamente ligas de alumínio [2]. Apesar de ter sido primeiramente desenvolvida para este tipo de ligas esta tecnologia pode igualmente soldar outro tipo de metais como por exemplo ligas de cobre, prata, titânio e magnésio [2],[3]. Tal versatilidade e domínio de aplicabilidade permite que esta tecnologia seja utilizada em componentes para aplicações aeronáuticas, aeroespaciais, ferroviárias, marítimas e automóvel [4], [5]. Na Figura 1.1 pode observar-se alguns exemplos onde esta tecnologia é aplicada. No comboio de alta velocidade *Shinkansen* japonês os painéis do chão em alumínio são soldados utilizando esta tecnologia, no *space Shuttle* é utilizada a SFL para soldar o depósito de combustível, no navio cruzeiro "The World" para a junção dos painéis do convés em alumínio é utilizado este processo.

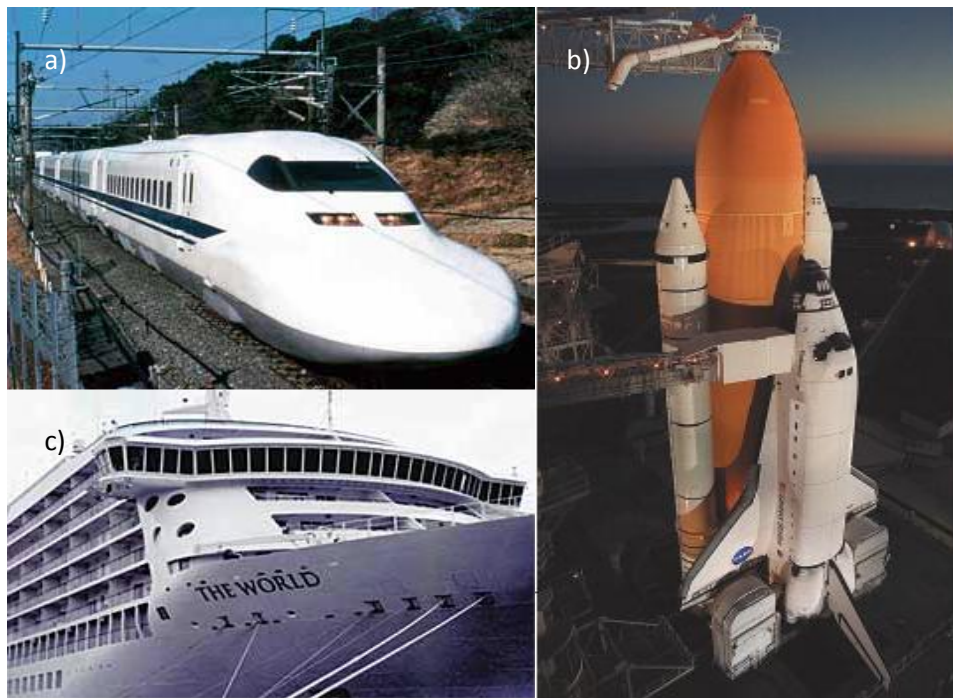


Figura 1.1- Exemplos de aplicação da SFL.

a) Comboio *Shinkansen* japonês [6], b) *Space Shuttle* [7], c) Navio cruzeiro "The World" [8]

Apesar de todas os benefícios que este processo demonstra, ainda subsistem algumas condicionantes nomeadamente em relação aos seus defeitos, pois estes colocam em causa a integridade da junta soldada [9].

A SFL quando não é realizada com os parâmetros adequados poderá apresentar vários defeitos, entre eles está o defeito na raiz do cordão de soldadura. Este é responsável pela diminuição da vida dos componentes devido à fadiga.

Vários desenvolvimentos teóricos e tecnológicos têm sido realizados em torno deste problema, mas ainda não é conhecido um método expedito para a sua eliminação.

A presente dissertação incide na criação de condições laboratoriais de um processo de soldadura por fricção linear assistida por corrente elétrica (SFLAE) que permita a realização de um cordão de SFL sem defeito na raiz do cordão através da passagem de corrente elétrica pelo material a soldar durante o processo. Mais concretamente aproveitando o efeito de *Joule* resultante para provocar um amaciamento do material e consequentemente um realçar do fluxo visco plástico do material.

## **1.2 Resumo Alargado**

### **1.2.1 Objetivos Tecnológicos e Científicos**

O objetivo deste trabalho foi criar um dispositivo que permitisse a eliminação do defeito na raiz do cordão que resulta na SFL.

Este objetivo tecnológico visa sobretudo o desenvolvimento ao nível da ferramenta e também ao nível da instrumentação. Da ligação destes desenvolvimentos resultará um sistema integrado de SFL assistido eletricamente, cujo propósito é eliminar o defeito na raiz e monitorizar a quantidade de corrente que passa pela zona da raiz do cordão de soldadura das chapas a soldar.

Com o presente trabalho pretende-se alcançar um objetivo científico que vai permitir perceber e estabelecer correlações entre os parâmetros do processo e o defeito na raiz do cordão.

### **1.2.2 Trabalho Realizado**

Tendo em vista o cumprimento dos objetivos traçados, começou por se realizar uma pesquisa bibliográfica nas áreas da SFL, métodos utilizados para eliminar os defeitos na raiz do cordão de SFL e processos assistidos por corrente elétrica.

Posteriormente, procedeu-se à realização de ensaios com materiais de sacrifício que demonstraram a dificuldade de eliminar os defeitos na raiz do cordão devido à falta de penetração do pino avançando-se então para o processo de SFLAE.

Foram estabelecidas modelações analíticas e numéricas para compreender mais aprofundadamente os fenómenos elétricos envolvidos no novo sistema de SFL nos quais se baseou o conceito do processo de SFLAE.

Após a avaliação dos modelos criados foram produzidos vários protótipos da ferramenta de SFLAE assim como a diversa instrumentação utilizada.

Finalmente procedeu-se à realização de ensaios que permitiram avaliar o efeito que a corrente elétrica teve ao passar pela montagem.

## **1.3 Estrutura da Dissertação**

A presente dissertação está estruturada em sete capítulos.

No capítulo 2 apresenta-se o resultado da pesquisa bibliográfica realizada onde se pretende mostrar estudos existentes referentes à SFL. Esta pesquisa encontra-se dividida em 4 partes distintas. Em § 2.2 aborda-se o tema da SFL, o seu processo, ferramentas utilizadas e defeitos mais comuns. Em § 2.3 os defeitos da raiz do cordão, em § 2.4 as técnicas existentes de eliminação dos defeitos da raiz e em § 2.5 aborda-se alguns processos assistidos por corrente elétrica, entre eles um caso de SFL assistida por corrente elétrica.

No capítulo 3 apresentam-se os conceitos no qual se baseia este trabalho. Em § 3.2 apresenta-se os ensaios preliminares de tentativa de eliminação do defeito na raiz do cordão de SFL recorrendo a uma montagem onde se usarem diferentes materiais de sacrifício sob as chapas a soldar, entre estas e a base de suporte. Em § 3.3 apresenta-se o conceito subjacente à SFLAE e em § 3.4 e § 3.5 apresenta-se os resultados da simulação analítica e numérica que validam o conceito de SFLAE.

No capítulo 4 apresenta-se o trabalho desenvolvido de modelação e prototipagem dos meios laboratoriais para a realização dos ensaios experimentais. Em § 4.2 apresenta-se a

ferramenta original e as suas evoluções, em § 4.3 e § 4.4 apresentam-se os diversos componentes de ligação que tornaram possível assistir o processo de SFL com corrente elétrica, em § 4.5 apresenta-se toda a instrumentação desenvolvida para a monitorização dos ensaios e em § 4.6 apresentam-se as diversas montagens utilizadas.

No capítulo 5 apresenta-se o plano de ensaios onde são descritos os equipamentos utilizados.

No capítulo 6 apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos experimentalmente. Em § 6.2 são relatados os resultados obtidos nos ensaios preliminares com material de sacrifício, apresenta-se depois em §6.3 os resultados obtidos nos ensaios de SFLAE sendo relatados os resultados da inspeção visual feita aos cordões de soldadura, análise metalográfica, ensaios de dureza e ensaios de condutividade elétrica.

No capítulo 7, apresentam-se as conclusões e sugestões para desenvolvimentos futuros.

## **2 Revisão do Estado da Arte**

### **2.1 Introdução**

Neste capítulo apresenta-se o resultado da pesquisa bibliográfica efetuada para a presente dissertação. O objetivo desta pesquisa foi enquadrar os desenvolvimentos descritos nos capítulos seguintes na área da SFL. Aborda-se o estado da arte das principais matérias envolvidas na tese, ou seja, a SFL, os seus defeitos e as técnicas utilizadas para a eliminação destes. É apresentado o processo de SFL assim como as ferramentas utilizadas e defeitos provenientes (§ 2.2). Em § 2.3 é apresentado o defeito na raiz do cordão, as suas causas e implicações. Em § 2.4 descrevem-se as técnicas existentes para a eliminação dos defeitos na raiz. Apresentam-se em § 2.5 alguns processos assistidos por corrente elétrica.

### **2.2 Soldadura por Fricção Linear**

#### **2.2.1 O Processo**

A SFL é um processo de soldadura no estado sólido, isto é, os materiais são ligados por deformação mecânica a uma temperatura inferior à temperatura de fusão, por outras palavras, "a soldadura no estado sólido inclui os processos que empregam pressão e em que os dois lados da junta são levados a contacto, a nível atómico, o qual é conseguido através de deformação, difusão atómica ou uma combinação de ambos os mecanismos" [10]. São exemplo desta soldadura para além de SFL, a soldadura por forjamento e a soldadura convencional por fricção.

O princípio de funcionamento da SFL consiste em utilizar uma ferramenta (Figura 2.1) não consumível especialmente desenvolvida para o efeito. Esta é composta por um *shoulder*, um pino e o corpo da ferramenta. A ferramenta é animada de movimento de rotação e possui um movimento linear ao longo da linha de soldadura. A energia sob a forma de calor, resultante da fricção da ferramenta nas peças a unir conduz a um amaciamento dos materiais, que sofrem uma acentuada deformação plástica devido à ação da ferramenta.

A junta a soldar é composta normalmente por duas chapas encostadas topo a topo ou uma sobre a outra, possibilitando assim várias configurações de juntas como ilustra a Figura 2.2.

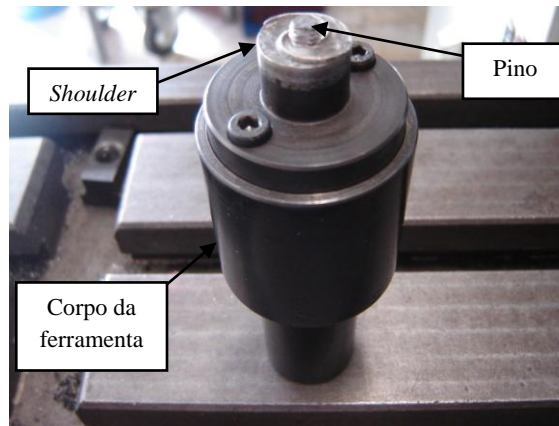


Figura 2.1- Ferramenta de SFL, *i-StirTool\_v2*

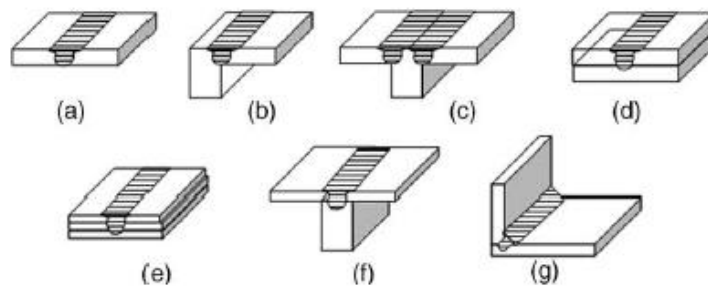


Figura 2.2- Juntas possíveis no processo de SFL [2].

a) Junta topo a topo, b) Junta topo a topo em L, c) Junta topo a topo em T, d) Junta sobreposta, e) Múltiplas juntas sobrepostas, f) Junta sobreposta em T, g) Junta em L

Para se obter uma junta soldada por fricção linear as chapas devem ser firmemente constrangidas na base da máquina, após o seu posicionamento/ alinhamento com a ferramenta, esta animada de movimento de rotação é pressionada através de uma força de compressão axial na direção da peça. Esta força mantém-se até que o pino (Figura 2.1), existente na extremidade da ferramenta penetre na zona de junção entre as chapas, e o *shoulder* entre em contacto com a parte superior destas. Nesta fase do processo, o atrito que se gera entre a ferramenta em rotação e as chapas produz calor em quantidade suficiente para aquecer o material a uma temperatura, que sendo inferior à temperatura de fusão, origina um amaciamento do material dando assim origem a um fluxo visco plástico à volta do pino. Durante o movimento de rotação da ferramenta, os materiais presentes nas duas faces da junta e localizados à frente da ferramenta (lado em avanço) sofrem uma deformação plástica intensa e são arrastados para a parte de trás da ferramenta (lado em retrocesso) originando assim o cordão de soldadura. De modo a obter uma ligação continua a ferramenta desloca-se linearmente ao longo da junta. A Figura 2.3 ilustra o processo descrito.

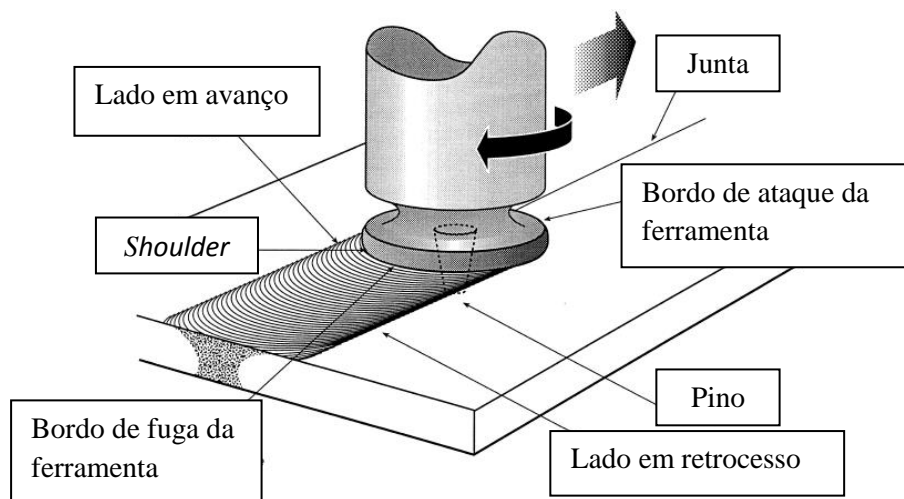


Figura 2.3- Representação esquemática do processo de SFL, adaptado de [4].

A SFL apresenta bastantes vantagens face à soldadura por fusão. Estas são, uma baixa distorção, boa estabilidade dimensional, o processo apresenta boa repetibilidade, isto é, como é isenta de operador existe uma boa repetibilidade do processo, durante o processo o material passa por uma intensa deformação plástica a elevada temperatura, isto resulta numa recristalização de grão dando origem a boas propriedades mecânicas. É considerada uma tecnologia mais limpa pois não emite fumo, é mais eficiente energeticamente, produz um cordão isento de escória, não precisa de gases de proteção nem de adição de material e a sua superfície não precisa de ser limpa após o processo. Também produz juntas de peso reduzido em comparação com a soldadura por fusão, o que trás grandes benefícios em termos de redução de peso das peças finais [2].

Para além de todas as vantagens mencionadas anteriormente, no caso dos alumínio a SFL apresenta a vantagem de permitir soldar ligas com diferentes elementos químicos entre si, o que não se verifica com os meios convencionais de soldadura por fusão [11], [12]. Também é possível com a SFL soldar MB diferentes entre si [13], [14], [15], o que traz grandes vantagens na área de projeto pois possibilita a criação de juntas dissimilares.

### 2.2.2 Ferramentas de SFL

Na SFL o aspeto mais crítico do processo é a ferramenta utilizada, pois esta influencia inteiramente a qualidade da junta soldada, nomeadamente a geração de calor, o fluxo visco

plástico criado, a potência requerida para o processo e a uniformização da junta obtida [16], [17].

Como foi dito anteriormente a ferramenta de SFL é constituída por um pino, um *shoulder* e pelo corpo da ferramenta. Esta pode ser constituída por uma peça única ou pode ser constituída por diversas peças ligadas entre si (Figura 2.1), esta última configuração apresenta uma grande vantagem que é a modularidade, conferindo à ferramenta a capacidade de alterar a sua geometria e a substituição de alguns dos seus componentes em caso de dano ao invés de inutilizar a ferramenta por completo.

Em termos dimensionais o raio do *shoulder* é normalmente três vezes superior ao raio do pino, este facto é muito importante pois se o raio do *shoulder* for muito pequeno o calor gerado por fricção pode não ser suficiente para levar o material a plastificar, mas por outro lado se for muito grande, o calor gerado vai ser muito elevado o que levará o material a fundir [3].

As ferramentas de SFL têm sofrido algumas alterações desde a sua invenção de maneira a tornar o processo mais expedito. Na Figura 2.4 apresentam-se algumas configurações de ferramenta de fricção linear. De notar que a grande alteração nas ferramentas se realizou ao nível do pino e geometria.

Na Figura 2.4 a) pode observar-se a ferramenta *Whorl*<sup>TM</sup>, esta permite soldar com maiores velocidades de avanço que a ferramenta convencional placas com até 60 mm de espessura, a ferramenta *MX-Triflute*<sup>TM</sup> (Figura 2.4 b) apresenta a vantagem de produzir cordões de soldadura mais uniformes e uma zona afetada mais estreita, esta ferramenta é uma evolução da *Whorl*<sup>TM</sup>, a ferramenta *Skew-Stir*<sup>TM</sup> (Figura 2.4 c) possui uma ligeira inclinação no pino face às ferramentas convencionais, e devido a isso produz uma melhor mistura do material pois o volume de material processado é maior, por último a ferramenta *Re-Stir*<sup>TM</sup> (Figura 2.4 d) tem um movimento de rotação alternado, este facto permite eliminar os problemas associados à assimetria dos cordões que podem ocorrer devido às grandes forças envolvidas no processo [18].



Figura 2.4- Ferramentas não convencionais de SFL, adaptado de [17]  
 a) *Whorl*<sup>TM</sup>, b) *MX-Triflute*<sup>TM</sup>, c) *Skew-Stir*<sup>TM</sup>, d) *Re-Stir*<sup>TM</sup>



Para além do uso destas novas ferramentas existem vertentes em que é utilizada mais do que uma ferramenta durante o processo, permitindo assim eliminar vários problemas. Estas vertentes permitem que as juntas sejam mais simétricas, haja uma melhor distribuição de calor ao longo de todo o volume do material processado e também permitem eliminar os defeitos que ocorrem durante o processo. São exemplo destas técnicas as ferramentas *Twin-stir*<sup>TM</sup>, *double side stir*, *Multi-stir* e *bobbin-tool* [19]. Sendo esta ultima de elevada importância para o estudo realizado nesta dissertação, pois esta ferramenta tem a capacidade de eliminar os defeitos na raiz do cordão de SFL. Por esta razão o conceito da ferramenta *bobbin-tool* é abordado com maior detalhe em § 2.4.

### 2.2.3 Defeitos Típicos

A SFL não apresenta apenas vantagens em relação a soldadura convencional (fusão), também apresenta limitações, as mais importantes são os defeitos que este tipo de soldadura apresenta. Este facto deve-se à soldadura ser realizada no estado sólido, logo não ocorrem problemas relacionados com as fraturas devido à temperatura e como é um processo automatizado se forem mantidos os parâmetros que estão estipulados para cada caso as soldaduras realizadas são livres de defeitos. Os defeitos que a SFL apresenta são igualmente importantes, estes resultam normalmente do não cumprimento dos parâmetros estabelecidos, o que acontece muitas vezes por razões de produtividade ou então por falta de controlo de qualidade.

Os defeitos mais comuns na SFL são a rebarba excessiva, os vazios e os defeitos na raiz do cordão [9], [20].

Na Figura 2.5 apresenta-se um cordão de soldadura com o defeito de rebarba excessiva. Este defeito tem origem quando a carga aplicada no *shoulder* é superior à necessária provocando assim que este penetre demasiado no material base (MB) [20]. O inconveniente deste defeito é a necessidade de maquinar a peça para lhe conferir um aspeto uniforme, este processo de remoção de aparas torna o processo de SFL dependente de outra operação, logo torna-se mais dispendioso.



Figura 2.5- SFL apresentando o defeito de rebarba [20]

Os defeitos conhecidos como vazios (*Voids*) são espaços vazios no cordão de soldadura, são originados normalmente no lado em avanço entre o *nugget* e a zona afetada termo mecanicamente (ZATM). Estes defeitos ocorrem quando a pressão de forjamento é insuficiente. Estes defeitos também ocorrem quando não são cumpridos os parâmetros operacionais estipulados para um determinado material a processar. Na Figura 2.6 apresenta-se uma macrografia dum cordão de soldadura onde é visível um vazio originado por uma velocidade de avanço muito elevada para o tipo de material que se estava a processar. Quando a velocidade de avanço é mais elevada que o recomendado o material recebe menos trabalho por unidade de comprimento soldado, isto faz com que o material em regime plástico não atinja temperaturas suficientemente elevadas para que este seja forjado pelo *shoulder* originando assim este tipo de defeitos.

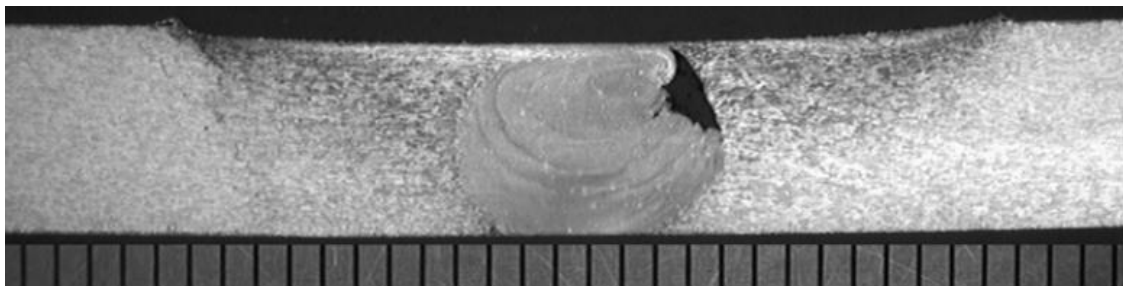


Figura 2.6- Vazio originado por uma velocidade de 400mm/min [9].

Se um vazio se estender longitudinalmente ao longo de toda a soldadura é denominado de *Wormhole* (Figura 2.7). Estes defeitos podem ser superficiais ou em volume e são também conhecidos por defeitos de falta de forjamento. As soldaduras com este tipo de defeito têm em comparação com as soldaduras livres do mesmo uma redução da sua resistência à tração em cerca de 10% e a sua ductilidade é reduzida para metade [20].



Figura 2.7- Wormhole superficial [20]

## 2.3 Defeitos na Raiz do Cordão

De todos os defeitos apresentados, os defeitos na raiz do cordão são os mais importantes daí que o objetivo principal desta dissertação inclua a sua eliminação.

Este tipo de defeitos é responsável pela diminuição da resistência mecânica das juntas soldadas levando a uma redução da vida do componente devido à fadiga [21-24].

Os defeitos na raiz do cordão resultam de um fraco fluxo visco plástico do material nessa zona provocado pela falta de penetração do pino da ferramenta no material a processar. Este facto deve-se ao insuficiente comprimento saliente do pino devido à preocupação que existe em não provocar dano na base de suporte sob as chapas. Este defeito também pode ocorrer devido ao desalinhamento das chapas a soldar ou à oxidação da matéria-prima [9], [25].

Estes defeitos resumem-se a duas morfologias. Os defeitos de falta de penetração, LOP. (*Lack of Penetration*) e os alinhamentos de óxidos. Os defeitos LOP devêm-se à falta de penetração do pino e consequente falta de ligação entre as chapas. No caso extremo pode até acontecer que a junta original ainda esteja presente na raiz do cordão, este caso particular já é pouco usual pois os parâmetros de operação já se encontram otimizados e se a soldadura se mantiver dentro destes não existe razão para ele ocorrer. Os alinhamentos de óxidos são definidos como ligações intermitentes entre ambas as partes a ligar. Estes últimos também se devem à oxidação da superfície do material [20].

A Figura 2.8 ilustra um corte transversal de um cordão de soldadura com a terminologia adotada, a ilustração foi propositadamente aumentada para que se pudesse identificar os diferentes elementos dos defeitos na raiz do cordão. A terminologia adotada está descrita na Tabela 2.1.

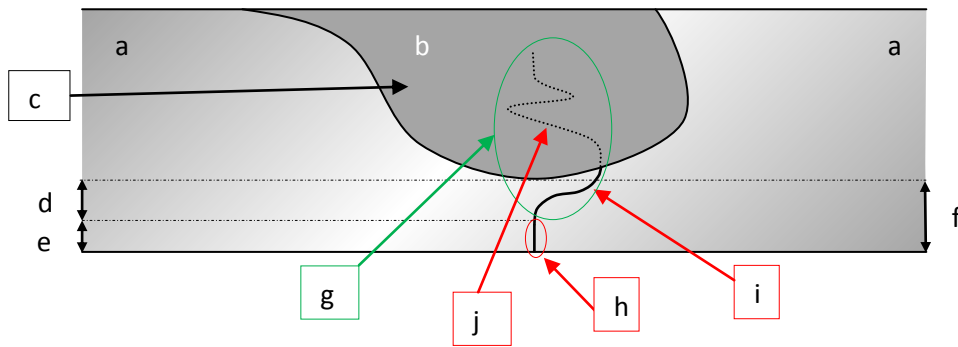


Figura 2.8- Representação esquemática dos defeitos na raiz

Tabela 2.1- Terminologia adotada.

Terminologia	
a)	Material base
b)	<i>Nugget</i>
c)	Zona dinamicamente recristalizada
d)	Zona deformada plasticamente
e)	Zona não deformada plasticamente
f)	Defeito da raiz: LOP
g)	Defeito da raiz: alinhamento de óxidos
h)	Junta original
i)	Zona de deformação plástica com alinhamento de óxidos
j)	Alinhamento de óxidos no nugget – “ <i>Silly S</i> ”

Os defeitos na raiz podem assumir a forma de LOP ou alinhamento de óxidos, mas também as duas em conjunto, são apresentadas macrografias dos possíveis defeitos da raiz que podem aparecer no cordão de soldadura. Na Figura 2.9 a) observa-se um defeito na raiz seguido de alinhamento de óxidos, neste caso ocorre deformação plástica em toda a espessura mas o *nugget* não ocupa toda a espessura da chapa, na Figura 2.9 b) pode observar-se uma soldadura com defeito na raiz seguido de alinhamento de óxidos, este defeito é provocado pela fraca deformação plástica junto à raiz do cordão.

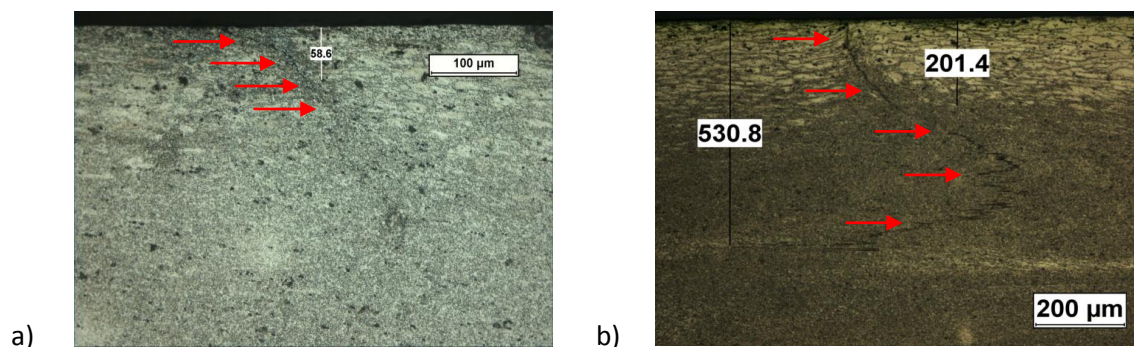


Figura 2.9- Macrografias de vários defeitos na raiz

a) Alinhamento de óxidos mas o nugget não atinge toda a espessura da chapa [26], b) Alinhamento de óxidos com fraca deformação plástica na raiz [26],

## 2.4 Solução para os Defeitos na Raiz

Para a eliminação dos defeitos na raiz do cordão de soldadura existem algumas soluções. A solução mais simples consiste em maquinar a zona da raiz do cordão posteriormente a este ter sido soldado. Ao maquinar esta zona o objetivo é eliminar o defeito na zona da raiz, é uma medida preventiva mas pouco prática porque acrescenta uma operação ao processo e nem sempre é possível de realizar.

Outra alternativa à eliminação do defeito na raiz passa pela utilização de ferramentas específicas, a mais utilizada é a ferramenta denominada *Bobbin Tool* (Figura 2.10). Esta ferramenta apresenta dois *shoulders* unidos pelo mesmo pino. Existem várias vantagens associadas a esta geometria de ferramenta, entre elas, a eliminação dos defeitos na raiz, melhores condições de operação, isto é, existe uma redução de custos ao nível do processo, pois a força axial aplicada pela máquina é menor e tem também um menor tempo de *set-up*. Como não tem base existe uma menor dissipação de calor, este facto permite aumentar a velocidade de avanço [27], [28].

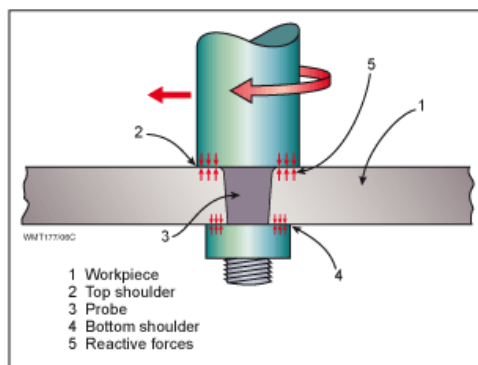


Figura 2.10- Ferramenta *Bobbin Tool* patenteada pelo TWI [28]

Outra das grandes vantagens desta ferramenta é o facto de a força vertical aplicada pela máquina durante o processo ser praticamente eliminada. Nesta ferramenta a força vertical presente no processo é apenas a que é contida entre os dois *shoulders*. Na Figura 2.10 pode-se observar representado pelas setas vermelhas as forças verticais (forças de reação) envolvidas no processo. Estas forças de reação devem-se ao aperto da ferramenta e à consequente dilatação térmica que ocorre durante o processo [29].

A ferramenta *Bobbin Tool* apresenta algumas limitações e na maior parte dos casos estas são as responsáveis por esta ferramenta não ser muito utilizada. A mais importante é a frequente fratura do pino devido a este ser o elemento de ligação entre os dois *shoulders*. Outra

limitação que esta ferramenta apresenta é o facto de as chapas não assentarem numa base, logo a montagem tem uma menor capacidade de condução, isto leva a uma menor dissipação de calor. Este facto foi visto anteriormente como vantagem, mas em casos extremos pode originar temperaturas excessivas para a realização do processo.

Esta ferramenta apresenta duas configurações a vertente fixa e flutuante (Figura 2.11). A vertente fixa (*fixed-gap bobbin tool*) não ajusta a carga aplicada no processo ao longo do cordão, enquanto a vertente flutuante ajusta a carga aplicada independentemente da espessura das chapas e da variação que estas sofrem ao longo do processo[27]. Devido a não ajustar a carga ao longo do processo a vertente fixa mantém uma distância fixa entre os *shoulders* durante o processo. Essa distância fixa faz com que a dilatação térmica sofrida pelas chapas aplique uma carga adicional à carga que o pino já tem devido ao aperto dos *shoulders*, o que origina a fratura muito frequente do pino, pelo que esta vertente é apenas usada em trabalhos pontuais [30].

A vertente flutuante foi a maior evolução na ferramenta *Bobbin Tool*, foi patenteada em 1999 por J.R. Ding e P.A. Oelgoetz [31] e esta permite controlar a força durante o processo ajustando a distância entre os dois *shoulders*. Varias outras ferramentas *Bobbin Tool* baseadas no mesmo princípio foram patenteadas depois desta. Esta vertente possibilita também que diferentes espessuras de chapas sejam soldadas continuamente, um exemplo da aplicação desta vertente é a soldadura realizada no depósito de combustível do *Space Shuttle* [7].

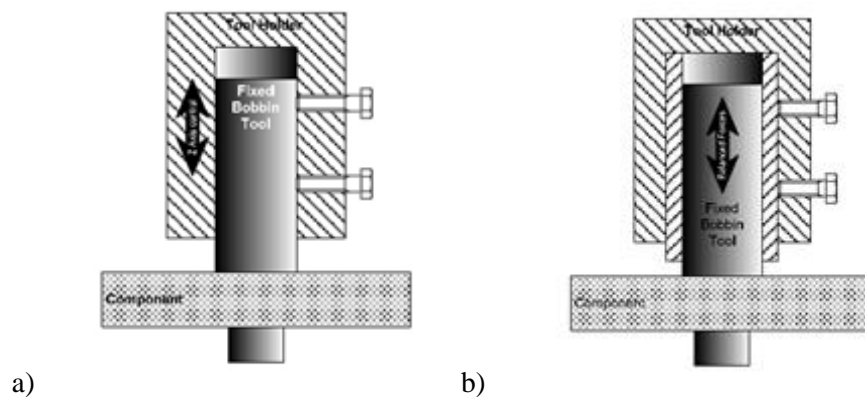


Figura 2.11- *Bobbin Tool*, vertente fixa e flutuante  
 a) Vertente Fixa, b) Vertente flutuante

## 2.5 Processos Assistidos por Corrente Elétrica

A corrente elétrica tem vindo a ser usada em vários processos industriais de maneira a criar um amaciamento do material. Os estudos que demonstram essas aplicações são apresentados no seguimento deste capítulo.

Mai, Jianning et al [32] utilizaram a corrente elétrica pulsada, para evitar o aquecimento em demasia causado pelo efeito de *Joule* para assistir a cunhagem de micro canais em placas de aço inox. Neste estudo são apresentadas duas montagens possíveis para o processo (Figura 2.12), uma em que a corrente atravessa a ferramenta e a peça (Figura 2.12a)) e outra em que a corrente só atravessa a peça (Figura 2.12b)). O único estudo realizado refere-se à segunda montagem. Os autores relatam que o facto de a corrente passar pela ferramenta pode reduzir a vida útil desta.

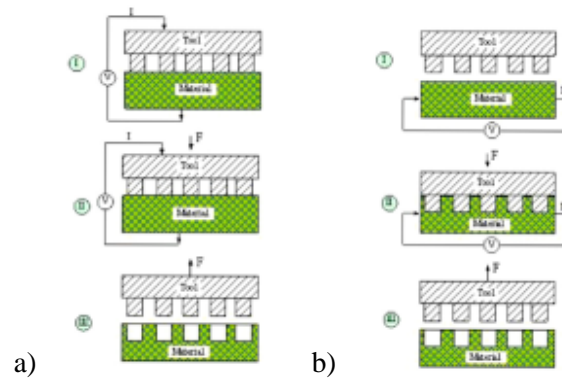


Figura 2.12- Aparato utilizado nos ensaios[32].

- a) Montagem em que a corrente a passa pela ferramenta e pelo material b) Montagem em que a Corrente só a passa pelo material

Na Figura 2.13 pode observar-se um gráfico que relaciona a força aplicada no processo com a profundidade do canal obtido. Conclui-se que quanto maior a densidade de corrente que atravessa a montagem maior vai ser a profundidade do canal obtido, possibilitando assim aumentar a profundidade do canal sem aumentar a força aplicada. Também se conclui que a qualidade superficial das peças obtidas com o processo assistido por corrente elétrica foi superior às peças obtidas pelo método original.



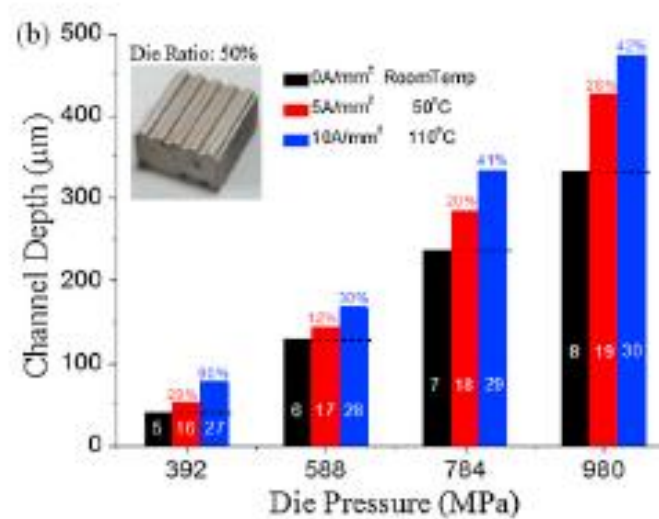


Figura 2.13- Profundidade do canal em relação a força aplicada [32]

Nos estudos realizados por Zimniak Z. e Radkiewicz [33] utilizou-se a corrente elétrica para assistir o processo de trefilagem de fio de cobre. Na Figura 2.14 pode observar-se um gráfico que mostra a força aplicada no processo ao longo do tempo. A linha a preto indica a força no processo convencional e na linha a cinzento é indicada a força no processo assistido por corrente elétrica. Conclui-se que a força necessária para o processo assistido por corrente elétrica é inferior à necessária no processo convencional. No estudo é relatado que esta força foi reduzida em 8% no processo assistido por corrente elétrica e que a qualidade superficial aumentou face ao processo convencional.

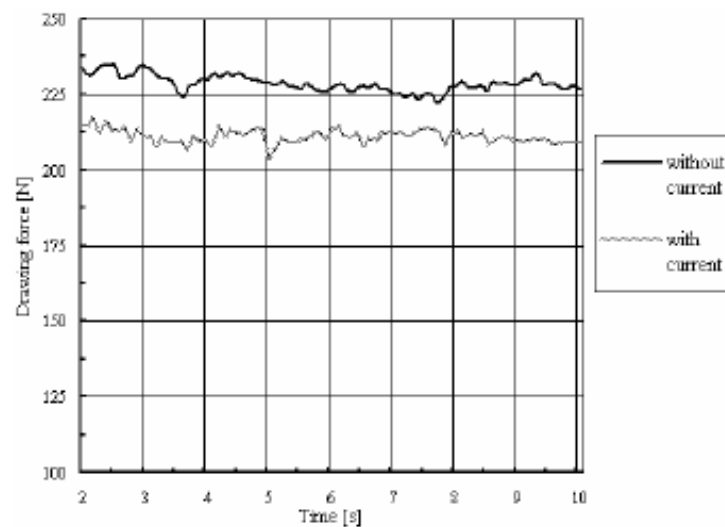


Figura 2.14- Comparação entre a força necessária para o processo com e sem corrente elétrica [33]



O estudo levado a cabo por Ferrando, W. A. [34] consistiu em utilizar a corrente elétrica para assistir o processo de SFL. O objetivo deste estudo foi reduzir a força vertical aplicada no processo de SFL através do amaciamento do material provocado pelo calor libertado por efeito de joule resultante da passagem da corrente elétrica, podendo assim criar uma máquina de SFL de dimensões mais reduzidas e custos de fabrico mais baixos, pois as ferramentas não têm de ser tão resistentes e reduzindo os custos operação devido ao facto de a força aplicada ser reduzida face ao processo convencional. Devido a todos estes fatores é também apresentada neste estudo a hipótese de criar um dispositivo portátil para o caso da aplicação em alumínio. A montagem experimental consistiu na passagem de corrente elétrica pelo material a soldar fazendo a passagem desta do *Shoulder* para a base de suporte [35], criando assim um amaciamento do material soldar e consequentemente reduzindo a força necessária para o processo. Nos ensaios realizados com esta técnica em alumínios a força vertical foi reduzida em aproximadamente 10 vezes face ao processo convencional de SFL.

## 2.6 Síntese do Capítulo

Neste capítulo apresentou-se uma pesquisa atualizada relativamente à SFL e alguns processos que utilizam a corrente elétrica com o objetivo de conseguir um amaciamento do material.

A SFL é um processo de soldadura recente que permite resolver muitas das limitações associadas à soldadura por fusão no caso dos alumínios. Embora apresente várias vantagens em relação à soldadura por fusão, também apresenta algumas limitações, nomeadamente em relação aos defeitos que dela resultam. O defeito mais importante pois dele resulta uma diminuição da vida do componente devido à fadiga é o defeito na raiz do cordão. As técnicas atualmente existentes para a eliminação deste defeito mostram algumas limitações.

Os processos assistidos por corrente elétrica permitem uma redução da força aplicada nesses processos devido a um amaciamento do material processado.



### 3 Metodologias para a Eliminação dos Defeitos na Raiz

#### 3.1 Introdução

Neste capítulo apresentam-se os ensaios com material de sacrifício, isto é, faz-se atravessar o pino em toda a espessura da chapa a soldar. O material de sacrifício é colocado sob as chapas e impede que o pino sofra qualquer tipo de dano mesmo no caso de o comprimento saliente deste ser superior à espessura das chapas. Estes ensaios preliminares permitiram de uma maneira expedita tentar eliminar o defeito na raiz.

É abordado também o conceito de soldadura por fricção linear assistida por corrente elétrica e os princípios em que se baseia. É realizado um estudo envolvendo um modelo numérico e analítico que permite perceber o efeito da corrente a quando da sua passagem pela montagem, os seus efeitos e o seu comportamento.

#### 3.2 Tentativas Preliminares de Eliminação do Defeito

Uma das principais causas do aparecimento de defeitos na raiz do cordão é a falta de penetração do pino na chapa a soldar. Este facto deve-se ao impedimento de fazer o pino atravessar todo o volume do material a soldar sem que este sofra algum tipo de dano ou danifique a base na qual assenta toda a montagem. Para fazer o pino atravessar toda a espessura do material a soldar é necessário que exista algum tipo de material de sacrifício onde o pino possa roçar sem sofrer qualquer tipo de dano. Este processo é ilustrado na Figura 3.1.

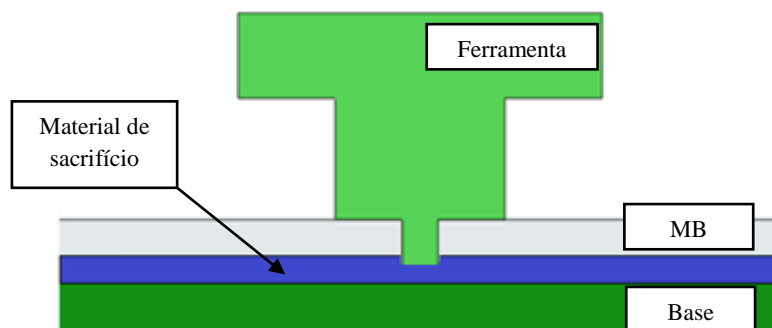


Figura 3.1- Representação esquemática da montagem I

Com os materiais disponíveis foram elaboradas as seguintes montagens:

- I. Chapa de sacrifício simplesmente apoiada sobre a base da máquina, onde se utilizaram os seguintes materiais: chapa de aço, platex, baquelite e alumínio (Figura 3.1);
- II. Base em aço que permite encastrar o material de sacrifício (grafite) (Figura 3.2);
- III. Base em aço com material encastrado (grafite) e com uma chapa de aço de 0,2 mm de espessura (como material de sacrifício) entre as chapas a soldar e a base (Figura 3.3).

Na Figura 3.2 pode observar-se a base que tem como função encastrar o material de sacrifício. Esta base é assente em cima da base de suporte da montagem e sob as chapas a soldar. Possibilita também que sejam encastrados diferentes materiais de sacrifício.

A SFL com material de sacrifício tem a vantagem de permitir que no fim da operação se obtenha um negativo que comprova que a ferramenta atravessou toda a espessura do material a soldar.

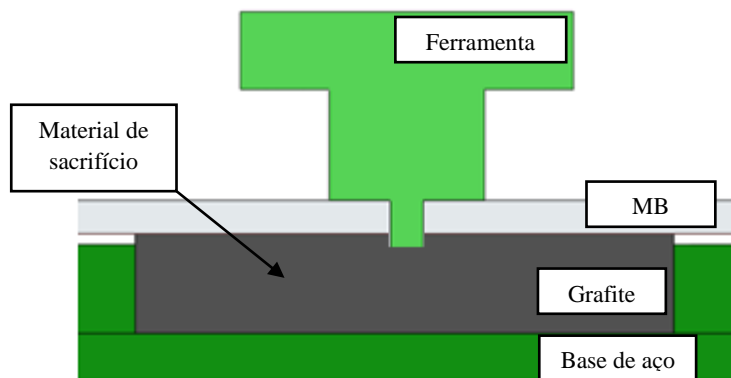


Figura 3.2- Representação esquemática da montagem II

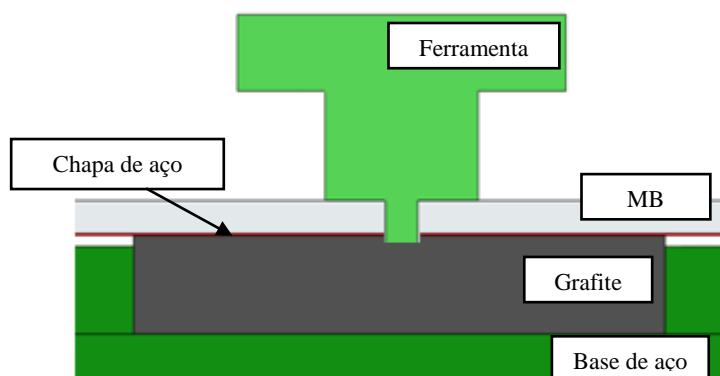


Figura 3.3- Representação esquemática da montagem III

### 3.3 Conceito de SFLAE

O conceito de Soldadura por fricção linear assistida por corrente elétrica (SFLAE) consiste em fazer passar pelo material uma corrente elétrica na zona da raiz da soldadura. O efeito de *joule* que decorre da passagem da corrente elétrica pelo material facilita a deformação plástica aumentando o fluxo visco plástico.

A passagem de corrente elétrica pela raiz do material faz com que o pino não tenha de passar por todo o volume da soldadura, eliminando assim os problemas relacionados com o dano da base e possibilitando a eliminação dos defeitos *LOP*, vistos em § 2.3.

Numa fase inicial destes trabalhos foi utilizada uma ferramenta de SFL (Figura 3.4 a) e uma base de suporte (Figura 3.4 b) dedicada. Estes componentes foram previamente desenvolvidos e produzidos no âmbito da atividade de investigação do Núcleo de Tecnologia Industrial (NTI) do DEMI. Esta ferramenta caracteriza-se por ter um pino oco no qual se encontra um condutor elétrico, fornecendo assim a corrente elétrica proveniente de uma fonte de alimentação à zona da raiz do cordão durante o processo. A base possibilita a passagem de corrente de volta à fonte de alimentação fechando o circuito.

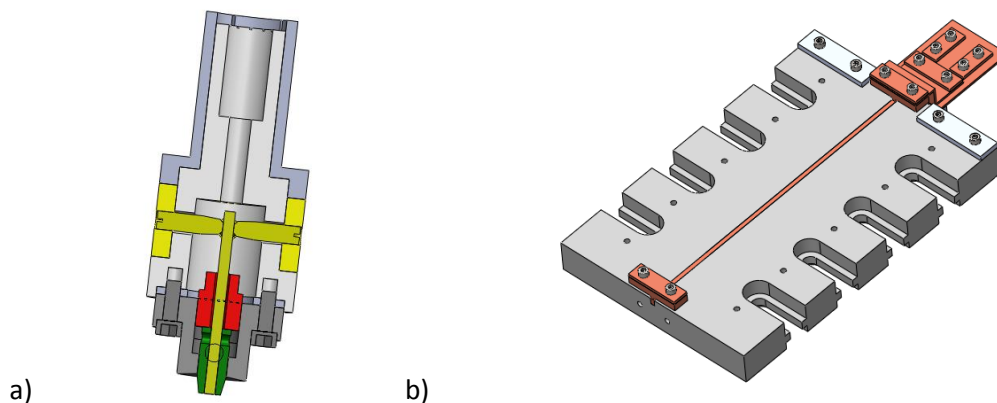


Figura 3.4- Modelação em *solidworks* da ferramenta assistida por corrente elétrica.

a) Corpo da ferramenta, *shoulder* e pino; b) Base

### 3.4 Simulação Analítica

Para calcular as temperaturas envolvidas foi criado um modelo analítico recorrendo à equação fundamental da calorimetria. Este modelo foi criado para ter uma ideia da ordem de grandeza das temperaturas atingidas com a aplicação da corrente elétrica, pois a temperatura

atingida pode ser muito elevada levando o material a fundir ou pode ser muito baixa e não provocar o efeito desejado.

Para esta simulação recorreu-se a um modelo que tem por base as seguintes simplificações:

- O processo ocorre em regime estacionário;
- O sistema que envolve as trocas de calor é um sistema fechado, pois não ocorrem trocas de calor com o meio envolvente;
- Não existe trabalho realizado, apenas existe troca de calor, pois neste modelo o calor deve-se apenas à passagem de corrente e não ao atrito gerado pela ferramenta;

Os parâmetros utilizados estão descritos na Tabela 3.1 e na Figura 3.5 observa-se o esquema do modelo simulado, ou seja, a temperatura máxima atingida devido à passagem de corrente pela montagem.

Tabela 3.1- Parâmetros

Material	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )
	$\rho_{ele}$ ( $\Omega \cdot m$ )
	C (J/Kg°C)
Geometria	h (mm)
	$\varnothing$ (mm)
Parâmetros FSW	V (mm/min)
Parâmetros Elétricos	I (A)

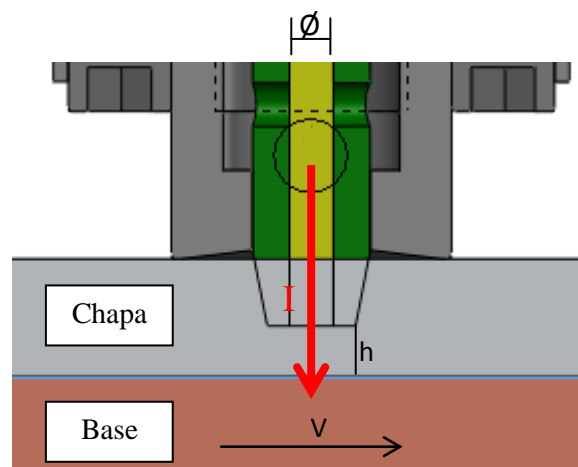


Figura 3.5- Esquema representativo do modelo

De acordo com as simplificações anteriormente descritas, considera-se que todo o calor gerado por efeito de Joule é responsável, segundo a equação fundamental da calorimetria (3.1), pelo aumento da temperatura do material a soldar na zona da raiz do cordão. O calor gerado por efeito de Joule é, por sua vez, dado pela equação 3.2.

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (3.1)$$

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t \quad (3.2)$$

Igualando as duas equações anteriores e substituindo os seus termos pelas equações da resistência elétrica (3.3), massa (3.4) e volume (3.5) ficam como incógnita os parâmetros do material, de geometria, da SFL e elétricos.

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} \quad (3.3)$$

$$m = \rho \cdot v \quad (3.4)$$

$$v = h \cdot \frac{\pi \cdot \phi^2}{4} \quad (3.5)$$

Escrevendo a equação simplificada da igualdade entre (3.1) e (3.2) em ordem à temperatura, resulta a equação (3.6). Esta equação dependente apenas dos parâmetros que se podem variar.

$$\Delta T = \frac{16 \cdot I^2 \cdot \rho_{ele} \cdot t}{\rho \cdot \phi^4 \cdot c} \quad (3.6)$$

Tendo em vista a identificação expedita de cada parâmetro rescreveu-se a equação (3.6). Os termos a verde são referentes aos parâmetros da SFL, a cinzento os parâmetros referentes ao material, a azul o parâmetro geométrico da ferramenta e a vermelho o parâmetro elétrico.

A equação que nos dá o aumento da temperatura pode ser escrita de duas formas diferentes, uma em função da velocidade (3.7) e outra em função do tempo (3.8).

$$\Delta T = \frac{16}{\pi^2} \cdot \frac{1}{v} \cdot \frac{\rho_{ele}}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{\phi^3} \cdot I^2 \quad (3.7)$$

$$\Delta T = \frac{16}{\pi^2} \cdot t \cdot \frac{\rho_{ele}}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{\phi^4} \cdot I^2 \quad (3.8)$$

É mais conveniente usar a equação em função da velocidade do que a equação em função do tempo, pois este é o parâmetro que se pode alterar diretamente na máquina de fricção linear.

Pode-se concluir da análise das equações obtidas que relativamente à geometria do pino só interessa o diâmetro deste e quanto menor ele for, maior será a temperatura atingida, ou seja, o comprimento do pino não influencia a temperatura. Da análise da equação final conclui-se que a temperatura vai ser maior quanto menor a velocidade de avanço linear da ferramenta e quanto maior for a corrente que atravessa o material da raiz do cordão, como seria de esperar.

Para a obtenção de resultados foram utilizadas propriedades de diferentes tipos de material, o cobre e três ligas diferentes de alumínio, a liga 2XXX, liga 6XXX e liga 7XXX. As propriedades dos materiais estão descritas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2- Propriedades dos materiais [36]

Material	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{ele}$ ( $\Omega \cdot m$ )	C (J/Kg°C)	T <sub>fusão</sub> (°C)
Cobre	8930	1,70E-08	385	1083,2
AA 2XXX	2780	4,91E-08	873	585
AA 6XXX	2700	3,78E-08	893	623
AA 7XXX	2810	4,48E-08	888	578

Para esta simulação os parâmetros da SFL, parâmetros de geometria e parâmetros elétricos foram escolhidos com base no equipamento que se vai usar e estão descritos na Tabela 3.3. Nesta tabela também estão descritos os resultados obtidos para cada um dos materiais.

Na Figura 3.6 apresenta-se o gráfico do aumento da temperatura em função da corrente imposta. Neste gráfico a velocidade e o diâmetro do pino foram mantidos constantes, V = 180 mm/min e o Ø = 3 mm e são apresentados os resultados para os diferentes tipos de materiais descritos na Tabela 3.2.



Tabela 3.3- Parâmetros a utilizar e temperaturas obtidas

Parâmetros a utilizar				Aumento da Temperatura (°C)			
#	I (A)	φ (mm)	v (mm/min)	Cobre	AA 2XXX	AA 6XXX	AA 7XXX
1	200	3	280	2,54	10,41	8,07	9,24
2	500	3	280	15,90	65,07	50,43	57,75
3	800	3	280	40,72	166,59	129,09	147,84
4	1000	3	280	63,62	260,30	201,71	231,00
5	600	3	90	71,25	291,53	225,91	258,72
6	800	3	90	126,67	518,28	401,63	459,94
7	200	3	56	12,72	52,06	40,34	46,20
8	600	3	56	114,51	468,54	363,08	415,80
9	200	2	280	8,59	35,14	27,23	31,18
10	500	2	280	53,68	219,63	170,19	194,90
11	600	2	280	77,30	316,26	245,08	280,66

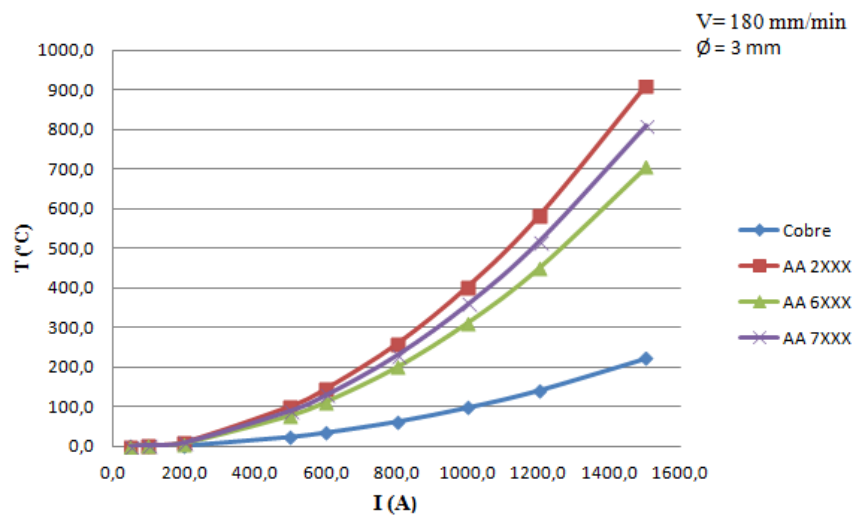


Figura 3.6- Gráfico do aumento da temperatura em função da corrente para diferentes materiais

### 3.5 Simulação Numérica

Para caracterizar o comportamento da corrente elétrica na montagem foi realizada uma simulação numérica. Para a realização desta simulação utilizou-se o *software CST studio suit*.

Esta simulação não só permitiu perceber o comportamento da corrente, mas também mostrou o percurso preferencial da mesma.

Na Figura 3.7 representa-se o modelo geométrico criado para a simulação da distribuição da densidade de corrente na montagem. O modelo consiste em três grupos de peças. A base, as chapas e a ferramenta. A base é constituída por um volume de material com as

propriedades elétricas do aço (verde) e um volume encastrado no seu centro com as propriedades elétricas do cobre (vermelho). As chapas a soldar são constituídas por um volume de material com as propriedades elétricas do alumínio (amarelo). A ferramenta, com a geometria circular é na sua maioria constituída por um volume de material com as propriedades do aço (verde) e alguns componentes com as propriedades elétricas do cobre (vermelho), que permitem a passagem da corrente pela alma do pino até à base. O modelo criado usa elementos de malha hexaédricos. Na Figura 3.8 a) apresenta-se os elementos de malha criados para a simulação, com malha refinada na zona da ferramenta onde passa a corrente e na zona da raiz do material entre a extremidade do pino e a base de suporte (Figura 3.8 b). Este refinamento permite uma melhor análise dos fenómenos obtidos nestas zonas. A malha criada apresenta cerca de 3.171.000 elementos.

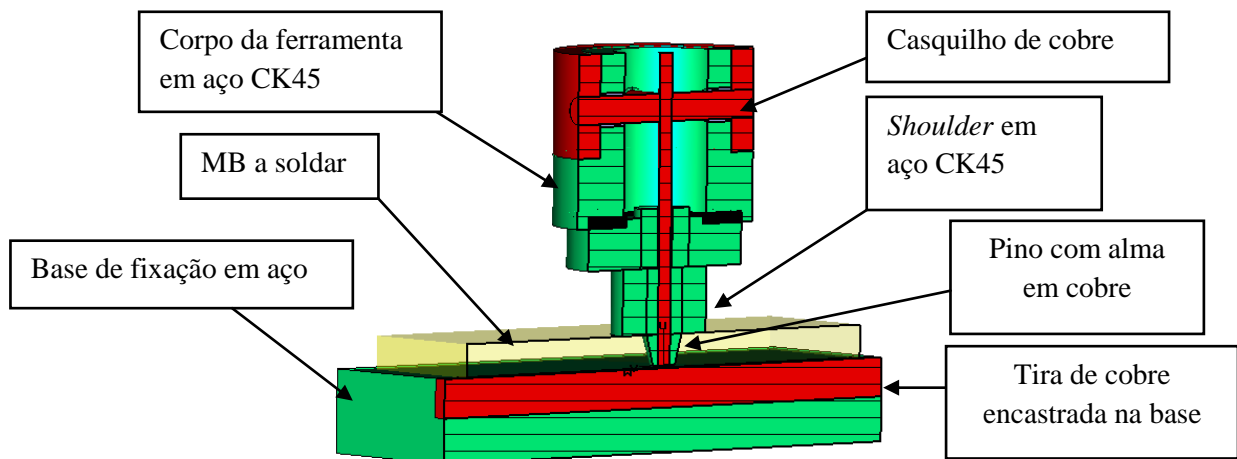


Figura 3.7- Modelo geométrico criado para a simulação

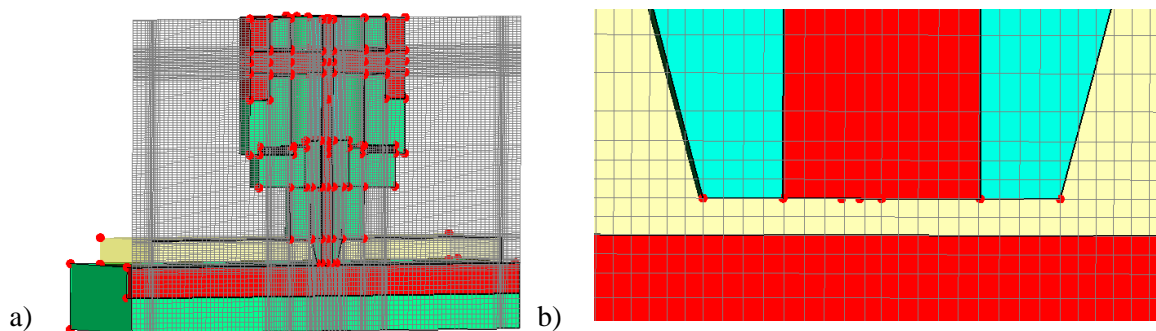


Figura 3.8- Elementos de malha do modelo geométrico  
a) Vista em corte da malha, b) Pormenor da malha na zona de contacto do pino com as chapas de alumínio

Na Figura 3.9 a) observa-se a densidade de corrente que passa pela montagem. Para uma melhor avaliação da passagem de corrente do pino para a base apresenta-se uma ampliação dessa zona. Verifica-se que a densidade de corrente não está apenas confinada à alma do pino e que diminui na interface entre a extremidade do pino e a base de suporte. A densidade de corrente que passa na zona da raiz é cerca de 60% da densidade que atravessa o pino (Figura 3.9 b).

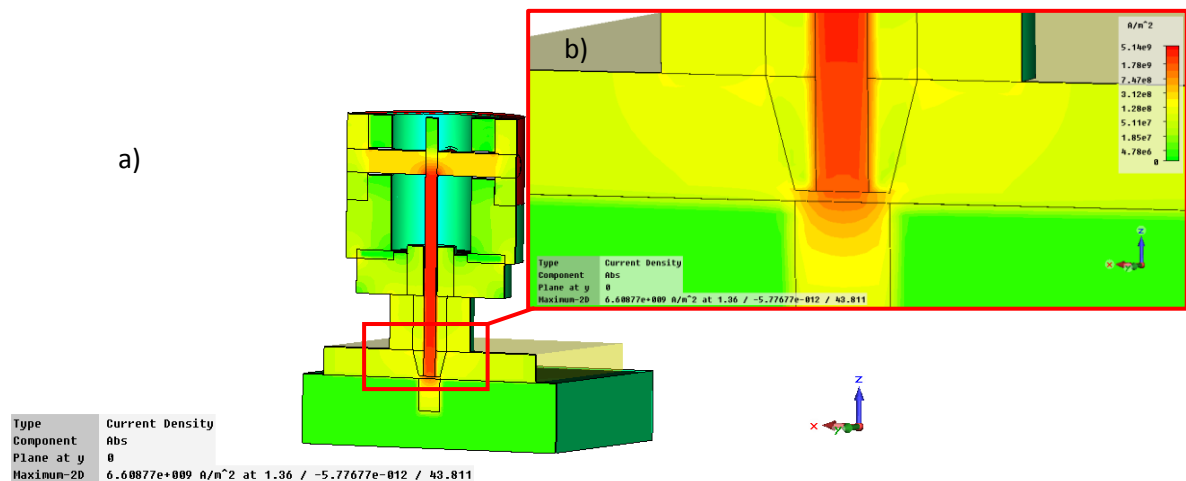


Figura 3.9- Ilustração representativa da densidade de corrente  
a) Densidade de corrente na montagem, b) Pormenor da densidade de corrente entre o pino e o bloco de cobre da mesa

Com a simulação numérica foi possível avaliar a distribuição da densidade de corrente na ferramenta de SFL desenvolvida. A corrente elétrica percorre sempre o caminho de menor resistência e no caso da ferramenta este é o caminho idealizado com os componentes em cobre, na Figura 3.10 apresenta-se esse resultado.

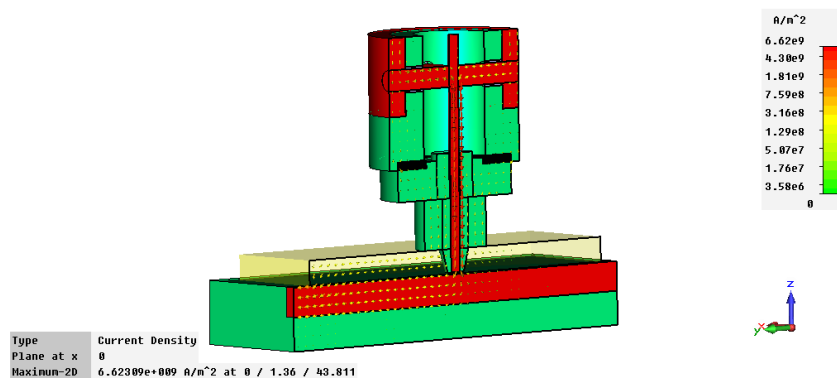


Figura 3.10- Representação do fluxo de corrente

A Figura 3.11 apresenta um pormenor do fluxo da corrente a quando da sua passagem pelo casquilho de cobre no exterior da ferramenta (local onde se impõe corrente) para a alma do pino. Confirma-se que a corrente circula preferencialmente pelos elementos de cobre da ferramenta, isto porque estes apresentam uma menor resistência.

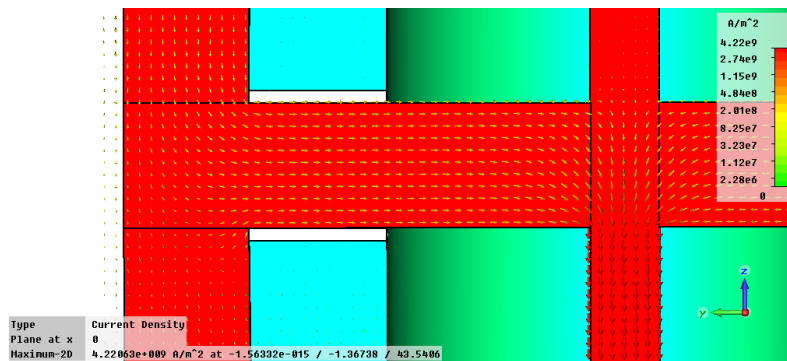


Figura 3.11- Vista em pormenor da passagem de corrente pelos elementos de cobre

### 3.6 Síntese do Capítulo

Neste capítulo apresentaram-se algumas propostas tecnológicas para reduzir ou eliminar o defeito da raiz do cordão de SFL. Numa primeira fase através de uma montagem recorrendo à utilização de material de sacrifício, e posteriormente com a SFL assistida por corrente elétrica.

Para a SFLAE realizou-se uma simulação analítica, onde se percebeu que os parâmetros disponíveis não levam à fusão dos materiais testados. Outro aspeto importante da análise foi perceber que a velocidade de avanço deve ser baixa, a corrente elevada e que quanto menor o diâmetro do pino maior vai ser a temperatura obtida.

Da modelação numérica dos fenómenos elétricos presentes na interface da ferramenta-base, foi possível simular o fluxo de corrente elétrica. Percebeu-se também que a ferramenta está bem projetada conferindo ao sistema uma boa passagem de corrente pela zona da raiz do cordão compreendida entre a extremidade inferior do pino e a base de suporte.

## 4 Desenvolvimento do Protótipo Funcional

### 4.1 Introdução

O trabalho descrito neste capítulo teve como objetivo a criação dos meios laboratoriais para aplicação do processo de SFL assistida por corrente elétrica.

Descreve-se pormenorizadamente todos os componentes laboratoriais desenvolvidos para a realização dos ensaios experimentais, quer a nível de passagem de corrente, quer a nível de monitorização. Apresentam-se a ferramenta original e as suas duas evoluções, bem como as diferentes montagens utilizadas ao longo deste trabalho.

A modelação dos vários componentes foi realizada com base no *software SolidWorks* e posteriormente foram produzidos utilizando diferentes processos.

### 4.2 Ferramenta de SFL

#### 4.2.1 Pino e *Shoulder*

O pino e o *shoulder* utilizados nos ensaios foram a única parte da ferramenta que não sofreram modificações ao longo deste trabalho, por isso são descritos à parte dos outros componentes da ferramenta.

O pino utilizado (Figura 4.1a) foi um pino concebido com um perfil cónico estriado na sua parte inferior com o objetivo de promover a mistura do material. O pino não tem movimento de rotação em relação à ferramenta. Esse constrangimento é realizado por meio de um facejamento realizado na parte superior deste e por um perno que aperta diretamente no *shoulder* contra a parte superior facejada. Também é impedido de ter movimento de translação por meio de um batente que é enroscado contra ele depois de a medida do comprimento saliente do pino ter sido estabelecida. Este pino tem a particularidade de ter um furo ao centro que é atravessado por um condutor (alma do pino), nos primeiros ensaios foi uma alma constituída por fio condutor de cobre, mas depois de alguns ensaios verificou-se que esta poderia não ser a escolha ideal pois este era consumido ao longo do ensaio. Estes resultados são apresentados em § 6.3.1 e levaram à alteração da alma do pino, passando a ser de inox no último ensaio. A alma é constrangida no pino por dois pernos roscados de aço.

O *shoulder* (Figura 4.1b) é o elemento de ligação entre o corpo da ferramenta e o pino. A sua base apresenta uma superfície côncava.

A Figura 4.1c) apresenta uma vista em corte onde é possível identificar os diferentes componentes que constituem esta parte da ferramenta.

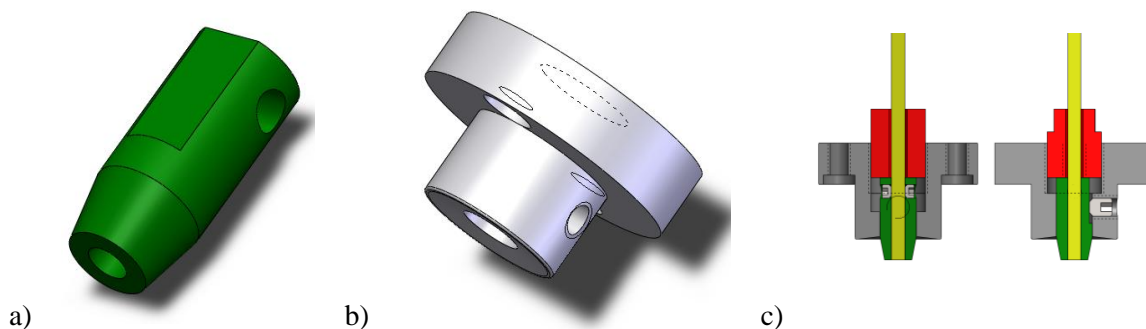


Figura 4.1- Pino e *Shoulder*

a) Vista tridimensional do desenho do Pino, b) Vista tridimensional do desenho do Shoulder, c) Vista em corte por dois planos perpendiculares da montagem dos dois elementos

O pino (Figura 4.2 a) e o *shoulder* (Figura 4.2 b) foram produzidos em aço AISI-H13 (W.N. 1.2344), com tratamento de têmpera e revenido, seguindo-se uma limpeza com esferas de vidro para retirar óxidos superficiais. Posteriormente foram sujeitas a um tratamento de nitruração iônica para aumentar a sua dureza superficial e promover o subsequente tratamento de oxidação com vapor de água a 500°C, com o objetivo de reduzir o fenómeno de adesão do alumínio às superfícies do pino e do *shoulder*. A alma do pino foi produzida a partir de fio condutor de cobre unifilar ao qual se retirou o revestimento isolante.

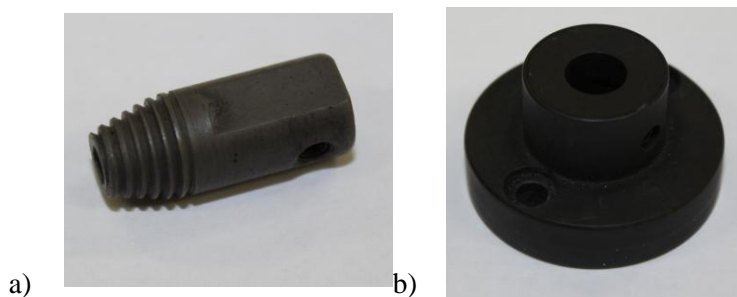


Figura 4.2- Protótipo produzido do pino e do *shoulder*

a) Pino, b) shoulder

#### 4.2.2 Ferramenta SFLAE\_v1

O objetivo da ferramenta foi possibilitar que a corrente atravessasse o material na zona da raiz do cordão entre a extremidade inferior do pino e a base de suporte no decorrer do processo de soldadura.

A ferramenta v\_1, anteriormente desenvolvida e produzida no âmbito das atividades de investigação do NTI é constituída por 11 elementos (Figura 4.3) para os quais se adotou a seguinte nomenclatura: corpo da ferramenta (1), *shoulder* (2), Pino (3), alma do pino (4), parafusos de fixação do *shoulder* (5), perno de fixação do pino (6), pernos de fixação da alma (7), anilha isolante (8), batente do pino (9), casquilho de cobre (10) e pernos de fixação da alma ao corpo da ferramenta (11). A ferramenta funciona como uma ferramenta convencional de SFL, mas tem a particularidade de permitir a passagem de corrente pela alma do pino (4) como foi descrito anteriormente. A corrente elétrica entra na ferramenta por meio do casquilho de cobre (10) e encaminha-se para a alma por meio dos pernos de fixação (11) também em cobre. O conjunto do pino (3) e *shoulder* (2) é isolado do corpo da ferramenta (1) por meio de uma anilha isolante (8) de baquelite, esta obriga a que a corrente apenas percorra o caminho ideal e não ocorrem perdas de corrente pelo percurso. O pino pode ser regulado em altura e contra este é apertado um batente (9) que o impede de ter movimento de translação durante o decorrer da soldadura.

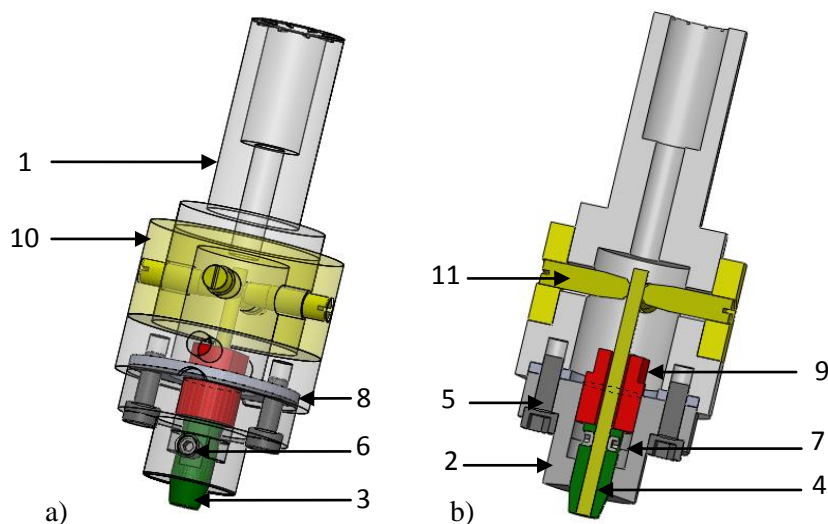


Figura 4.3- Ferramenta SFLAE\_v1

a) Vista tridimensional semitransparente do desenho de conjunto, b) Vista em corte longitudinal.  
Nomenclatura: corpo da ferramenta (1), *shoulder* (2), Pino (3), alma do pino (4), parafusos de fixação do *shoulder* (5), perno de fixação do pino (6), pernos de fixação da alma (7), anilha isolante (8), batente do pino (9), casquilho de cobre (10), pernos de fixação da alma ao corpo da ferramenta (11)

O corpo da ferramenta SFLEA\_v1 (Figura 4.4) foi produzido no mesmo material e sofreu os mesmos tratamentos que foram anteriormente descritos na concepção do pino e do *shoulder*.



Figura 4.4- Protótipo da ferramenta SFLAE\_v1

#### 4.2.3 Ferramenta SFLAE\_v2

A ferramenta SFLAE\_v2 surgiu com a necessidade de reduzir a resistência à passagem da corrente elétrica que se observava na ferramenta v1. Esta nova ferramenta (Figura 4.5) consistiu numa versão simplificada da ferramenta SFLAE\_v1 e utilizaram-se vários componentes desta versão. Eliminou-se o sistema de entrada de corrente por meio de duas escovas de grafite e um casquilho em cobre, passando-se a fazer a entrada de corrente diretamente da zona do porta fresas para o corpo da ferramenta. A nova ferramenta é constituída por 10 elementos para os quais se adotou a seguinte nomenclatura: corpo da ferramenta (1), *shoulder* (2), Pino (3), alma do pino (4), parafusos de fixação do *shoulder* (5), perno de fixação do pino (6), pernos de fixação da alma (7), anilha isolante (8), batente do pino (9) e parafuso de afinação vertical (10). O batente do pino (9) foi redesenhado para que a alma (4) o pudesse atravessar e ser esmagada entre este e o parafuso de afinação vertical (10) de maneira a se obter um bom contacto e com menos resistência que o sistema anterior. Como a entrada de corrente elétrica era feita pelo corpo da ferramenta (1) havia a possibilidade de esta sair pelo *soulder* (2) em vez de sair pela alma do pino (4) essa possibilidade foi evitada recorrendo-se a uma anilha de isolante (8) de baquelite. O resto da ferramenta manteve-se inalterado.



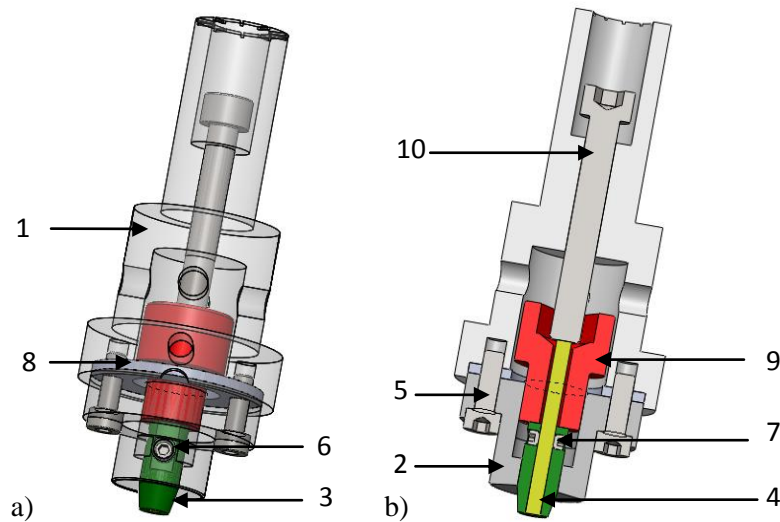


Figura 4.5- Ferramenta SFLAE\_v2

a) Vista tridimensional semitransparente do desenho de conjunto, b) Vista em corte longitudinal.  
Nomenclatura: corpo da ferramenta (1), *shoulder* (2), Pino (3), alma do pino (4), parafusos de fixação do *shoulder* (5), perno de fixação do pino (6), pernos de fixação da alma (7), anilha isolante (8), batente do pino (9), parafuso de afinação vertical (10)

Para a produção da ferramenta SFLAE\_v2 (Figura 4.6 a) mantiveram-se os componentes em comum com a ferramenta SFLAE\_v1, o batente do pino (Figura 4.6 b) foi produzido a partir de um parafuso M14.

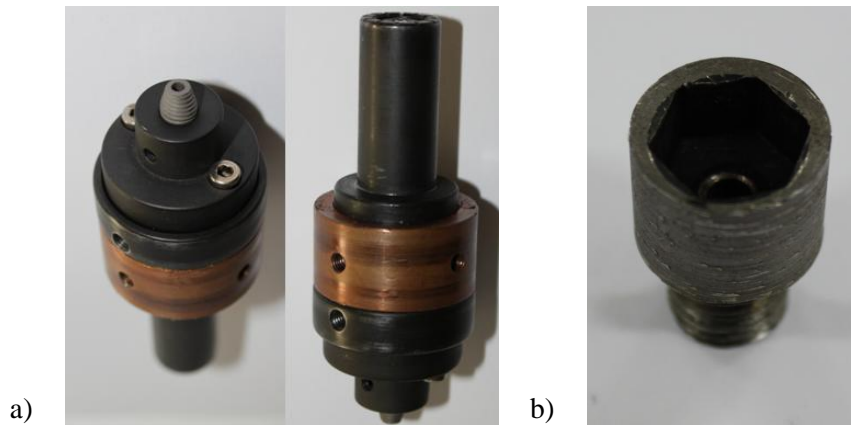


Figura 4.6- Protótipo da ferramenta SFLAE\_v2  
a) Ferramenta SFLAE\_v2, b) Batente do pino.

#### 4.2.4 Ferramenta SFLAE\_v3

A criação da ferramenta SFLAE\_v3 surgiu uma vez mais com a necessidade de reduzir a resistência à passagem de corrente por parte da ferramenta, sem nunca pôr em causa a sua resistência mecânica, e também da incerteza de um bom contacto elétrico verificado na ferramenta SFLAE\_v2 aquando dos ensaios experimentais. A nova ferramenta (Figura 4.7) é constituída por 11 elementos para os quais se adotou a seguinte nomenclatura: corpo da ferramenta (1), *shoulder* (2), Pino (3), alma do pino (4), parafusos de fixação do *shoulder* (5), perno de fixação do pino (6), pernos de fixação da alma (7), anilhas isolantes (8), batente do pino (9), cilindro de ligação (10) e perno de fixação do cilindro de ligação (11). Das versões anteriores foram aproveitados o pino (3) e o *shoulder* (2) assim como os seus elementos de ligação com o resto da montagem, parafuso de fixação do *shoulder* (5), pernos de fixação da alma (7) e perno de fixação do pino (6). Como o maior problema era a resistência que o corpo da ferramenta oferecia à passagem de corrente redesenhou-se por completo este componente, optando-se por um elemento de ligação com a máquina, cilindro de ligação (10) em cobre. A ligação deste com a parte inferior da ferramenta foi feita através de um corpo da ferramenta em inox (1), foi escolhido este material por este oferecer um valor baixo de condutividade (2 %IACS) fazendo com que a corrente passe pela alma do pino (4) e não pelo corpo da ferramenta. A passagem de corrente foi feita do cilindro de ligação (10) para a alma do pino (4) por meio de 2 pernos roscados (7) que a constrangiam diretamente contra a parede do cilindro de ligação obtendo assim uma grande área de contacto. O cilindro de ligação por sua vez assentava em duas anilhas isolantes (8) fabricadas em inox. O objetivo com a introdução das duas anilhas foi criar duas resistências à passagem de corrente, obrigando esta a passar pela alma do pino. Para o constrangimento de movimento do pino voltou-se à solução utilizada na primeira versão da ferramenta, um batente (9) e um perno roscado (6), estes dois impedem o seu movimento em relação à ferramenta.

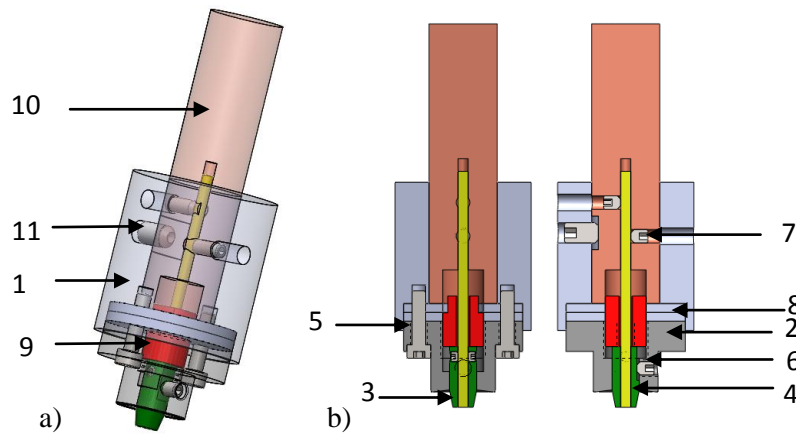


Figura 4.7- Ferramenta SFLAE\_v3

a) Vista tridimensional semitransparente do desenho de conjunto, b) Vista em corte por dois planos perpendiculares da ferramenta SFLAE\_v3.

Nomenclatura: corpo da ferramenta (1), *shoulder* (2), Pino (3), alma do pino (4), parafusos de fixação do *shoulder* (5), perno de fixação do pino (6), pernos de fixação da alma (7), anilhas isolantes (8), batente do pino (9), cilindro de ligação (10) e perno de fixação do cilindro de ligação (11)

Os componentes da ferramenta SFLEA\_v3 (Figura 4.8) comuns à ferramenta SFLAE\_2 mantiveram-se, o corpo da ferramenta (Figura 4.8 b) foi produzido através da maquinação de um cilindro de inox, o cilindro de ligação (Figura 4.8 c) foi produzido a partir de varão de cobre e as anilhas isolantes (Figura 4.8 d) foram criadas a partir de chapa de inox.

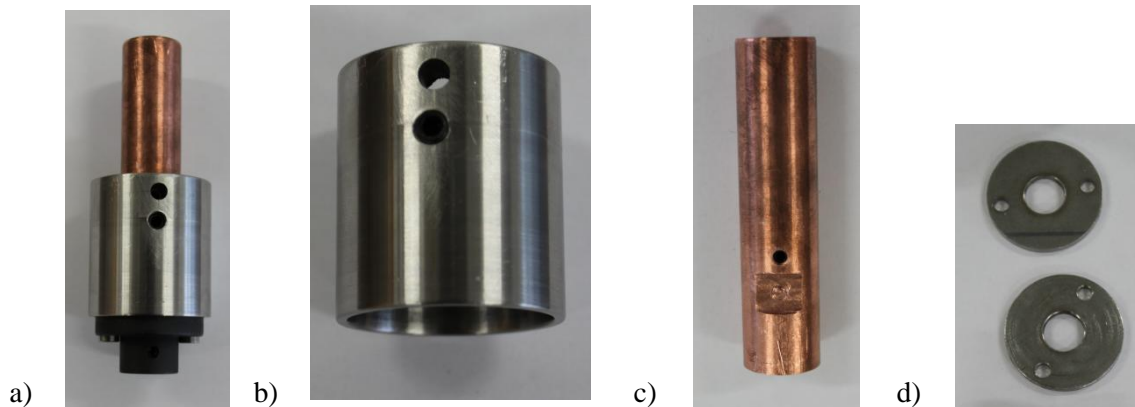


Figura 4.8- Protótipo produzido da ferramenta SFLAE\_v3

a) Ferramenta SFLAE\_v3, b) corpo da ferramenta, c) cilindro de ligação, d) anilhas isolantes

### 4.3 Base

A base de suporte de toda a montagem é constituída por 6 elementos (Figura 4.9) para os quais se adotou a seguinte nomenclatura: base de aço (1), tira de cobre (2), longarinas de

fixação (3), ligação I (4), ligação II (5), chapas de alinhamento (6). A função deste componente é assegurar uma base rígida a toda a montagem e permitir a passagem de corrente proveniente da zona da raiz de volta à fonte de alimentação, fechando assim o circuito. A passagem de corrente pela base é conseguida recorrendo ao encastramento de uma tira de cobre (2). Na Figura 4.9 b) apresenta-se uma vista em corte transversal á base onde se encontra ilustrado o encastramento. Este encastramento tem como objetivo confinar a corrente elétrica apenas à tira de cobre, fazendo assim com que esta fique confinada apenas na zona da raiz do cordão. A corrente proveniente da zona entre a extremidade do pino e a base passa para a ligação I (4) através da tira de cobre, e daí para a fonte de alimentação fechando assim o circuito. Foi feita uma ligação através de um condutor em cobre multifilar entre a ligação I (4) e a ligação II (5). Esta ligação permite o redirecção da corrente caso esta não passe diretamente para a ligação I. As chapas a soldar assentam em cima da base (1) e a junção destas fica centrada na tira de cobre (2), são constrangidas de movimento através das longarinas de fixação (3) que por sua vez são fixas à base. O alinhamento das chapas entre si e entre a tira de cobre (2) é feito encostando as chapas a soldar às chapas de alinhamento (6).

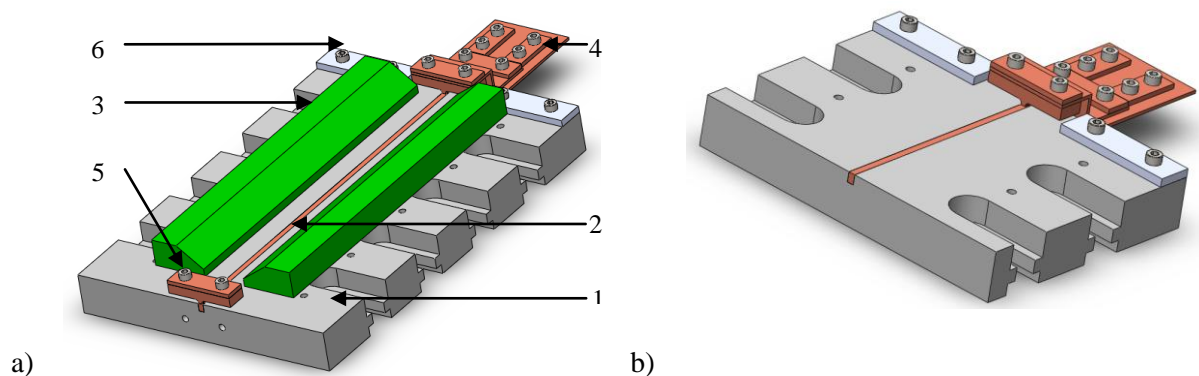


Figura 4.9- Base de suporte.

a) Base e os seus elementos constituintes, b) Vista em corte por um plano transversal à base.  
Nomenclatura: base de aço (1), tira de cobre (2), longarinas de fixação (3), ligação I (4), ligação II (5), chapas de alinhamento (6)

A base de suporte (Figura 4.10) foi produzida em aço CK45 na qual foi encastrada uma tira de cobre. As ligações I e II foram feitas a partir de chapas de cobre e o condutor de cobre utilizado foi um condutor multifilar de 8 mm de secção que permitem uma passagem de corrente nominal máxima de aproximadamente 170 A.

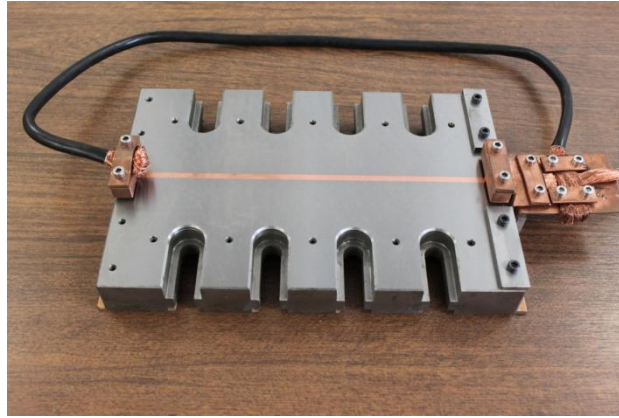


Figura 4.10- Protótipo da base de suporte

## 4.4 Sistema de Alimentação da Ferramenta

### 4.4.1 Sistema de escovas

Para alimentar a ferramenta com corrente elétrica proveniente de uma fonte de alimentação foi utilizado um sistema de escovas de grafite (Figura 4.11 a). Este sistema de escovas apenas foi utilizado em conjunto com a Ferramenta SFLAE\_v1. Na Figura 4.11 b) pode observa-se a montagem das escovas e a ferramenta, este sistema permite que a corrente elétrica passe para a ferramenta estando esta animada de movimento de rotação, as escovas são atuadas por molas mantendo assim uma força constante na ferramenta, garantindo assim um bom contacto elétrico.

O sistema de escovas está eletricamente isolado da fresadora e acoplado à cabeça da fresadora pelo topo desta como ilustrado na Figura 4.11c).

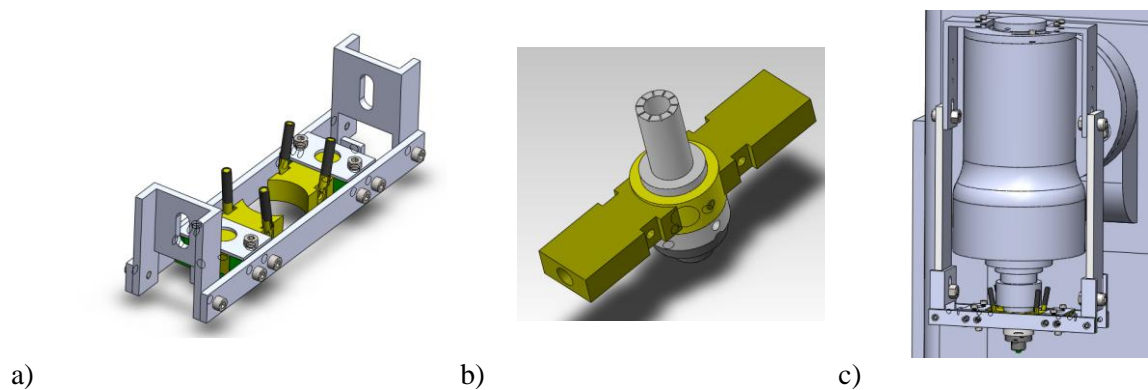


Figura 4.11- Sistema de escovas.

a) Sistema de escovas, b) Pormenor da ligação das escovas à ferramenta, c) Vista tridimensional do conjunto suporte das escovas e ferramenta SFLEA\_v1 na fresadora

O suporte das escovas (Figura 4.12 a) foi produzido em alumínio e as escovas (Figura 4.12 b) em grafite para permitir a passagem de corrente elétrica para a ferramenta com esta em rotação. As barras que ligam o sistema de escovas à fresadora foram produzidas em *teflon* para isolar o suporte da máquina. Por sua vez o suporte do sistema de escovas é fixo ao topo da cabeça da fresadora. Na Figura 4.12 c) pode observar-se a montagem do sistema de escovas.

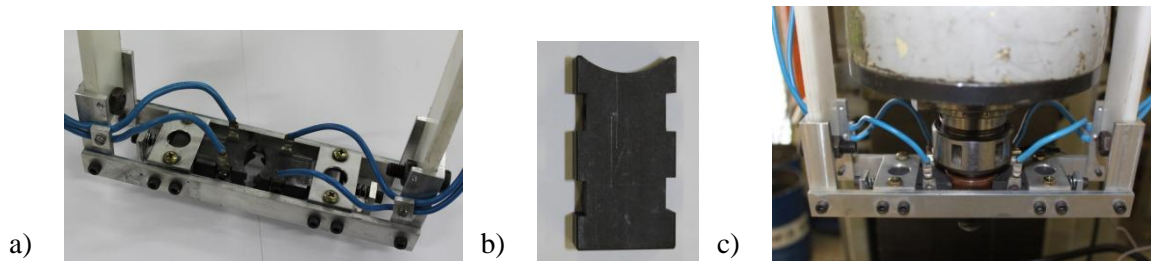


Figura 4.12- Protótipo do suporte das escovas  
a) Suporte das escovas, b) Escova de grafite, c) Suporte das escovas na fresadora

#### 4.4.2 Sistema de Ligação Direto

O sistema de ligação direto surgiu da necessidade de se reduzir a resistência à passagem de corrente que se observava no sistema de escovas, e ao seu aquecimento excessivo verificado nos primeiros ensaios. Devido ao facto de a máquina utilizada não possuir componentes eletrónicos, a entrada de corrente fez-se pela própria máquina. A passagem da corrente proveniente da fonte de alimentação para a ferramenta e consequentemente para a raiz do material a soldar foi feita através de chapas de ligação acopladas aos parafusos de suporte da cabeça da fresadora. Na Figura 4.13 apresenta-se uma imagem desta ligação. Esta permitiu usar a ferramenta SFLAE\_v2 e posteriormente a ferramenta SFLAE\_v3. Para realizar a ligação direta à cabeça da fresadora utilizou-se duas chapas de ligação em cobre (Figura 4.13 a) para uma maior área de contacto e reduzir assim a resistência à passagem da corrente elétrica.



a)



b)

Figura 4.13- Chapas de ligação

a) Chapa de ligação em cobre com o respectivo aperto, b) Montagem das chapas na fresadora

## 4.5 Sistema de Aquisição de Dados

### 4.5.1 Sensor Amperimétrico

No mercado existem diversos aparelhos próprios para medir a corrente num condutor, estes aparelhos são designadas por pinças amperimétricas. Estas pinças são na sua maioria para corrente alternada (AC) e para valores nominais inferiores a 800-1000 A. As que existem para corrente contínua (DC) são dispendiosas. Ambos os tipos de pinças amperimétricas não permitem a aquisição de dados o que inviabiliza a sua utilização neste trabalho. Para monitorizar e registar os dados referentes à corrente que passa no sistema foram criados sensores amperimétricos.

Os sensores amperimétricos têm como principal componente os transdutores de corrente. Estes transdutores permitem a conversão de uma corrente primária numa corrente secundária possibilitando assim a sua aquisição. Esta conversão respeita uma razão que é característica de cada transdutor. Os transdutores utilizados foram transdutores da marca LEM® e o seu princípio de funcionamento baseia-se no efeito de *Hall*. Embora todos os transdutores utilizem o efeito de *Hall* a tecnologia de funcionamento empregue em cada um é diferente. As características de cada transdutor bem como as ligações elétricas necessárias ao seu funcionamento estão descritas nos *datasheet* presentes nos anexos A1, A2 e A3.

Para a aquisição dos valores obtidos pelos transdutores foi utilizada a placa de aquisição de dados NI USB 6008 da NATIONAL INSTRUMENTS®.



Foram produzidos dois sensores amperimétricos. Para o primeiro utilizou-se o transdutor amperimétrico LEM<sup>®</sup> LA 200-P/SP1 (Anexo A1). A Figura 4.14 a) apresenta a modelação do sensor amperimétrico. O condutor proveniente da fonte de alimentação é ligado aos terminais de um suporte em forma de T e uma barra. Esta configuração permite que os dois elementos de ligação sejam desacoplados permitindo assim que o T atravesse o transdutor amperimétrico permitindo a leitura da corrente.

Para produzir o sensor Amperimétrico\_v1 (Figura 4.14b) foi usado um T e uma barra ambos em cobre produzido a partir de chapa. Estes dois elementos assentam em blocos isolantes produzidos em *Teflon*.

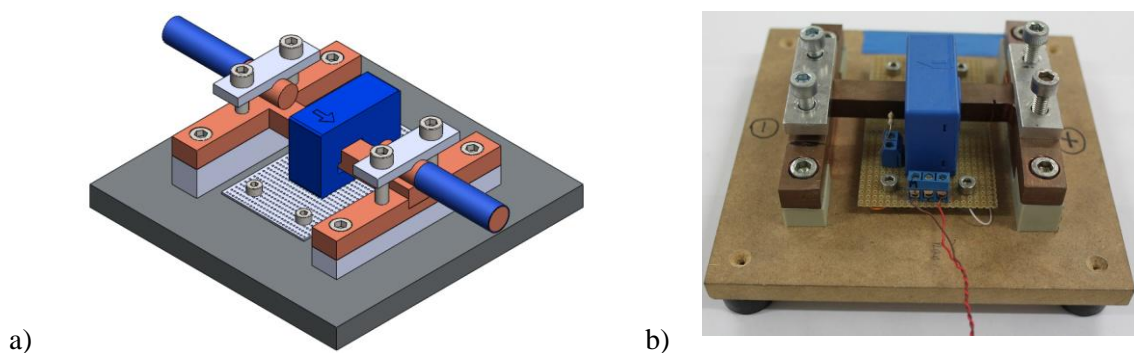


Figura 4.14- Sensor Amperimétrico\_v1.  
a) Vista tridimensional da modelação do sensor Amperimétrico\_v1 b) Protótipo do Sensor Amperimétrico\_v1

Este sensor foi posto de parte logo nos primeiros testes, pois pode medir corrente AC e DC até um valor máximo de 300 A. Os valores obtidos nos primeiros ensaios foram muito superiores, pelo que foi desenvolvido um novo sensor que permitiu adquirir valores superiores.

Na Figura 4.15 apresenta-se a modelação do sensor amperimétrico\_v2. Neste sensor foram usados dois transdutores amperimétricos para uma redundância de valores medidos. Nesta versão foram utilizados o transdutor LEM<sup>®</sup> LF 1005-s (Anexo A2) e o transdutor LEM<sup>®</sup> HTA 400-s (Anexo A3). Foram escolhidos estes dois transdutores pois ambos têm um intervalo de medida de 0 a 1000 A, podendo chegar aos 1500 A no caso do primeiro e pelo facto de os dois transdutores utilizarem uma tecnologia diferente um do outro, o que contribui ainda mais para a redundância dos valores obtidos.

Foram produzidas dois suportes em alumínio para suportar um varão de cobre que atravessa os dois sensores, aos terminais do varão foi ligado o cabo de alimentação, como ilustrado na Figura 4.15 b).



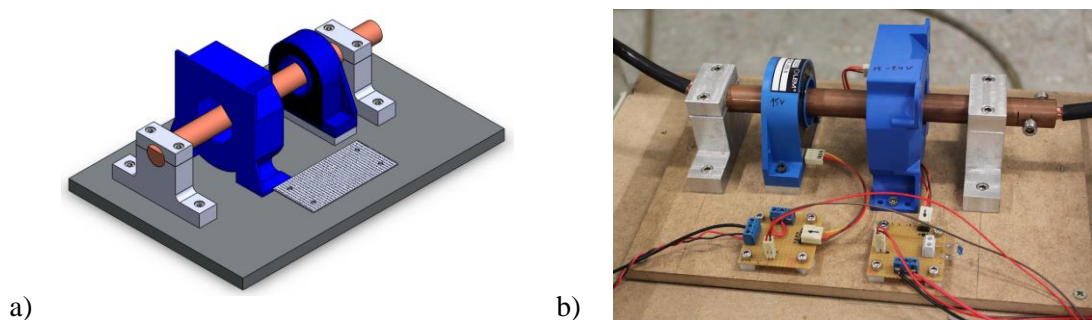


Figura 4.15- Sensor amperimétrico\_v2  
a) Modelação do sensor amperimétrico\_v2 b) Protótipo produzido do sensor amperimétrico\_v2

Para a aquisição de voltagem aos terminais da bateria e aos terminais da ferramenta e da base de suporte realizou-se a aquisição desta informação através da placa de aquisição de dados NI USB 6008. Para medir esta diferença de potencial foi criado um circuito constituído por duas resistências em série em que o objetivo foi criar um divisor de tensão para não danificar a placa de aquisição de dados pois o valor máximo que a placa suporta são 10V.

#### 4.5.2 Software

Para a aquisição de dados referentes a cada ensaio foi utilizado um *software* desenvolvido para o efeito. Este *software* foi desenvolvido usando linguagem G, no ambiente *LabVIEW™* 2012 da NATIONAL INSTRUMENTS®. O programa é composto por um VI. Na Figura 4.16 mostra-se a janela inicial onde se definem os parâmetros do ensaio (A), parâmetros do equipamento (B) e opções de gravação (C). Na mesma janela apresentam-se a representação gráfica (D) da corrente que atravessa o sistema, da diferença de potencial na bateria, da diferença de potencial nos terminais e a temperatura em cada termopar. No Anexo A4 apresenta-se o código deste programa.

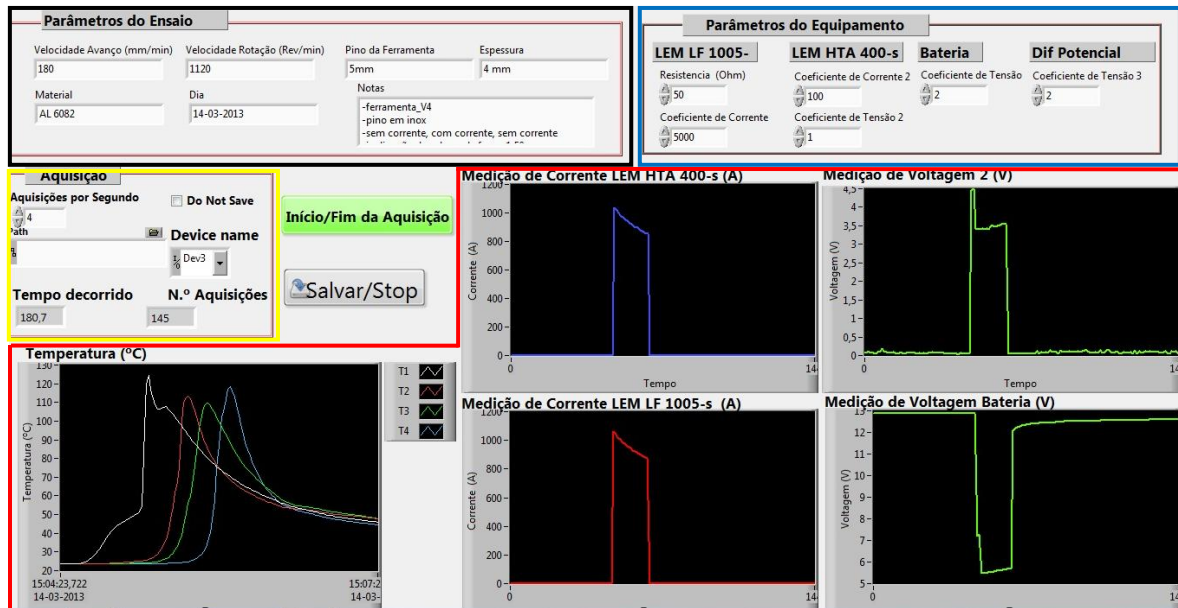


Figura 4.16- Painel frontal do programa de aquisição de dados com os diferentes campos assinalados Zona Preta A: parâmetro do ensaio; zona Azul B: parâmetros do equipamento; Zona Amarela C: opções de gravação; Zona Vermelha D: representação gráfica da corrente medida nos sensores amperimétricos, da diferença de potenciais na bateria e pelas pinças e da temperatura obtida em cada termopar.

Os dados gerados são gravados em formato \*.txt (Anexo A4.2). Além de todos os sinais provenientes do sensor amperimétrico, da bateria e dos termopares, o ficheiro permite também guardar as condições do ensaio (velocidade de avanço, velocidade de rotação), a data do ensaio, as características do material (espessura das chapas e material utilizado), características da ferramenta (pino e *shoulder* utilizados) e as resistências utilizadas nos circuitos resistivos. Podem ainda ser gravadas notas importantes a registar na altura do ensaio.

## 4.6 Montagem Experimental

Nos ensaios experimentais foram utilizadas três montagens, montagem I, montagem II e montagem III.

As três montagens resultaram do esquema geral ilustrado na Figura 4.17 que consiste numa fonte de alimentação, sensor amperimétrico, sistema de aquisição de dados e fresadora. A diferença nas montagens reside na ferramenta utilizada, e na maneira como se fez a passagem de corrente da fonte de alimentação para a zona da raiz do cordão.

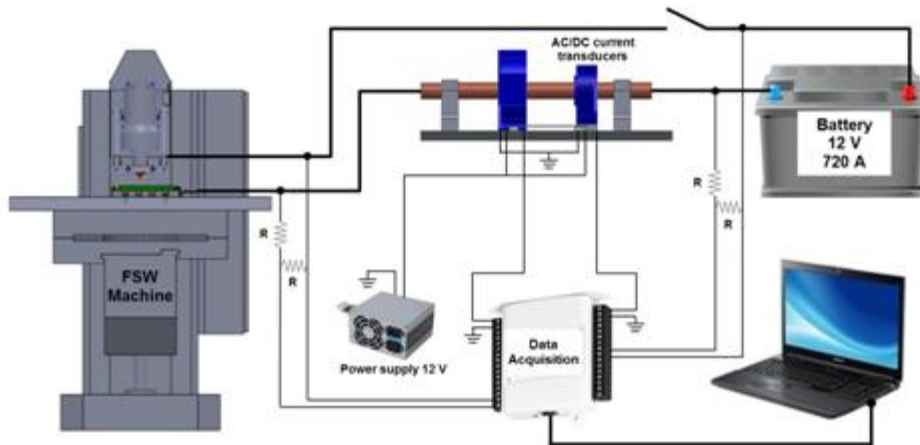


Figura 4.17- Esquema geral da montagem

Como o sistema de aquisição de dados utilizado foi sempre o mesmo, para possibilitar uma montagem mais expedita e para que este pudesse ser utilizado em trabalhos futuros todo este sistema foi montado num carro (Figura 4.18).

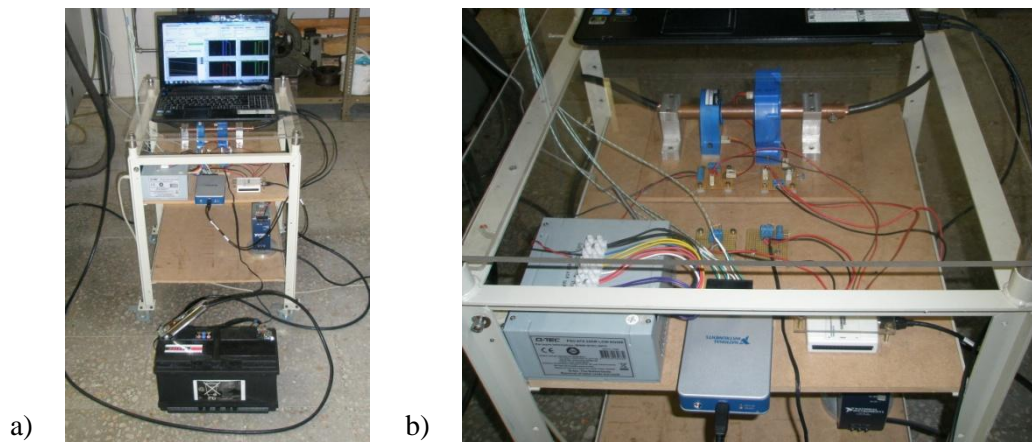


Figura 4.18- Sistema de aquisição de dados  
a) Sistema de aquisição de dados e fonte de alimentação b) pormenor dos sensores amperimétricos e placas de aquisição.

A montagem I utiliza a ferramenta SFLAE\_v1 e o sistema de escovas, como está representado na Figura 4.19. No primeiro ensaio numa tentativa de isolar a ferramenta da máquina foi utilizado um casquilho de *teflon* entre o corpo da ferramenta e a pinça de aperto da fresadora.

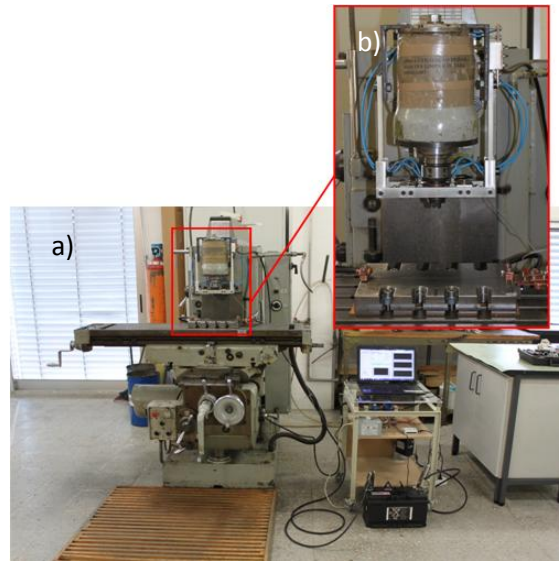


Figura 4.19-Montagem experimental da montagem I  
a) Montagem I, b) pormenor do sistema de escovas/ ferramenta

Na Figura 4.20 apresenta-se a montagem II e a montagem III ambas utilizaram o sistema de ligação direto para a alimentação de corrente elétrica. A diferença entre as duas montagens é a ferramenta utilizada em cada uma. Na montagem II foi utilizada a ferramenta SFLAE\_v2 (Figura 4.20 a) e na montagem III foi utilizada a ferramenta SFLAE\_v3 (Figura 4.20 b).

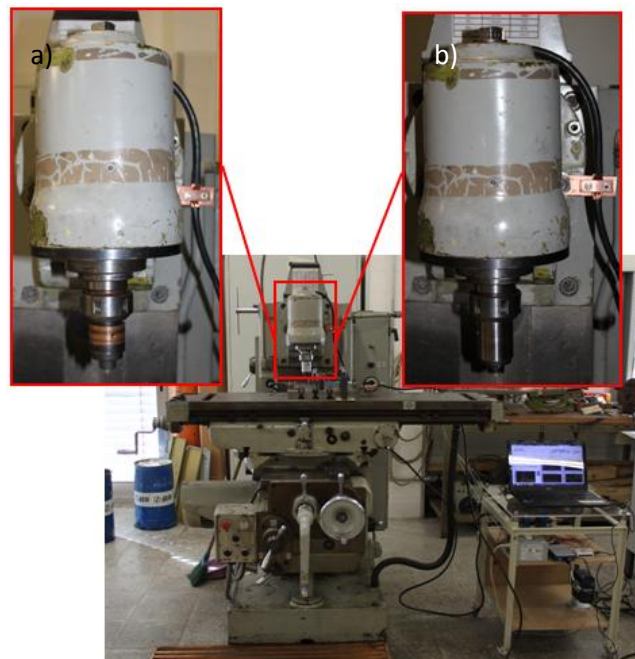


Figura 4.20- Montagem experimental II e III  
a) Montagem II, b) Montagem III

Na Figura 4.21 apresenta-se o sistema de fixação que se utilizou nos ensaios de SFLAE. Este sistema consiste em quatro garras fixas à base de suporte, estas por sua vez são fixas à base da Fresadora. Os parafusos de ligação foram isolados por um casquilho de plástico. Com o intuito de isolar a base de suporte e as garras de fixação estes componentes assentam sobre uma base de *platex*. O objetivo deste isolamento foi impedir a dispersão de corrente pela base da máquina.

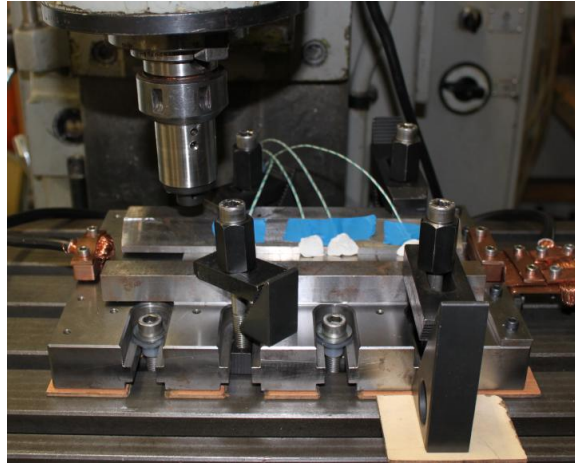


Figura 4.21- Sistema de fixação das chapas a soldar

## 4.7 Síntese do Capítulo

Neste capítulo foi apresentado o desenvolvimento do protótipo funcional, assim como os processos de desenvolvimento do mesmo.

Foram desenvolvidos e descritos os diferentes elementos do protótipo funcional, nomeadamente: i) a Ferramenta SFLAE e as suas diferentes versões; ii) a base de suporte; iii) o sistema de alimentação da ferramenta e as suas diferentes versões; iv) o sistema de aquisição de dados, constituído pelos diferentes sensores amperimétricos e *software* de aquisição de dados. Foi feita uma descrição detalhada dos fatores de projeto tidos em consideração, informações técnicas e procedimento de produção dos mesmos.

Por fim apresentou-se toda a informação relativa às diferentes montagens utilizadas nos ensaios de SFLAE, os seus elementos constituintes e diferentes versões.



## 5 Procedimento Experimental

### 5.1 Introdução

O trabalho experimental descrito neste capítulo teve como objetivo avaliar os protótipos funcionais do processo de SFLAE.

São apresentados neste capítulo os diferentes parâmetros dos ensaios experimentais, primeiramente os referentes aos ensaios com material de sacrifício, seguidos dos ensaios de SFLAE.

São também apresentados neste capítulo os meios laboratoriais utilizados na análise metalográfica, ensaios de dureza e ensaios de condutividade. Estes ensaios têm como objetivo avaliar as alterações que ocorrem no material a quando da passagem de corrente elétrica.

### 5.2 Caracterização do Material Base

O material utilizado neste estudo foi a liga de Alumínio AA6082-T6 em forma de chapa com as dimensões 203x103x3 mm e 203x103x4 mm, estas chapas foram divididas longitudinalmente em dois provetes permitindo assim a sua fixação na base de suporte. As propriedades do material utilizado estão descritas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1- Composição química da liga AA 6082-T6 (% em peso) [36]

AL	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn
95.2-98.3	máx.	máx	máx	0.60-1.2	0.40-1.0	0.70-1.3	máx	máx.
	0.25	0.1	0.50				0.10	0.20

### 5.3 Equipamento Utilizado

Para a realização dos ensaios experimentais recorreu-se a uma fresadora convencional (Figura 5.1) existente no laboratório de Processos Mecânicos do NTI do DEMI da Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia. Esta fresadora tem uma base que se movimenta nos eixos X, Y, Z, permite controlar a velocidade de avanço e de rotação da



ferramenta, no entanto não tem controle de força vertical, este parâmetro pode ser ajustado com recurso à inclinação da cabeça da Fresadora.



Figura 5.1- Fresadora convencional utilizada nos ensaios.

## 5.4 Parâmetros dos Ensaios Experimentais

### 5.4.1 Ensaios Preliminares com Material de Sacrifício

Para estes ensaios foram utilizadas chapas com 3 mm de espessura. A ferramenta utilizada foi a *i-StirTool\_v2* [37]. O pino (Figura 5.2a) utilizado foi um pino com 5 mm de diâmetro, roscado e trifacetado para proporcionar um melhor fluxo durante a soldadura. O critério utilizado para a medição da altura do pino foi medir o comprimento saliente deste a partir da crista das estrias. A Figura 5.2 apresenta a ferramenta utilizada e a montagem experimental.



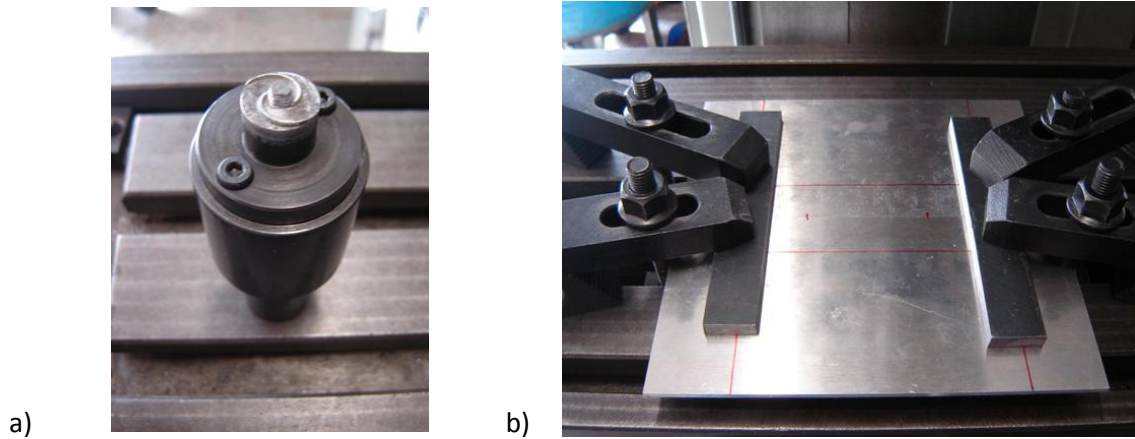


Figura 5.2- Montagem experimental  
a) Ferramenta *i-StirTool\_v2*, b) Montagem experimental

A Tabela 5.2 descreve os parâmetros utilizados em cada vertente. A velocidade de avanço ( $V$ ) e a velocidade de rotação ( $\Omega$ ) foram sempre constantes, com  $V = 280 \text{ mm/min}$  e  $\Omega = 710 \text{ rev/min}$ . Nos ensaios #6 e #7 o ângulo de inclinação da cabeça da fresadora foi de  $1.5^\circ$ .

Tabela 5.2- Parâmetros dos Ensaios realizados nas vertentes preliminares.

Ensaio n°.	Montagem	Comprimento saliente do pino (mm)	Material de sacrifício
#1	I)	3.5	Chapa de aço de 0.2 mm sobre uma base de alumínio
#2	I)	3.5	Platex
#3	I)	3.5	Baquelite
#4	II)	3.7	Grafite
#5	III)	3.7	Chapa de aço de 0.2 mm
#6	II)	3.3	Grafite
#7	II)	3.0	Grafite
#8	III)	3.0	Chapa de aço de 0.2 mm
#9	III)	2.8	Chapa de aço de 0.2 mm
#10	III)	2.7	Chapa de aço de 0.2 mm

Para encastrar a grafite usada na montagem II e III foi necessário criar uma base para o efeito. Esta base de encastramento (Figura 5.3) permite por meio de duas barras ajustáveis encastrar qualquer material de sacrifício de maneira a que este fique confinado durante o processo de SFL.

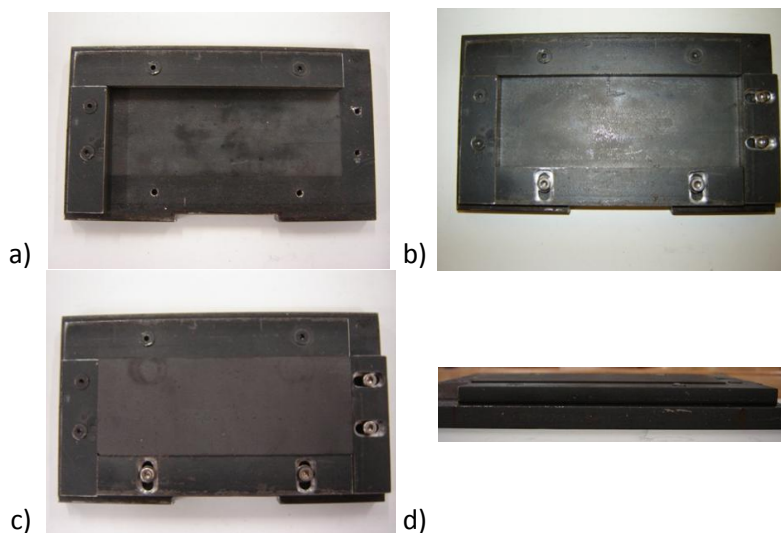


Figura 5.3- Base de encastramento dos materiais de sacrifício,  
a) Vista de topo sem as barras ajustáveis, b) Vista de topo da base completa, C) Vista de topo com a grafite, d) Alçado da base com a grafite

#### 5.4.2 Ensaios de SFLAE

Para estes ensaios foram utilizadas chapas com 4 mm de espessura. No mesmo ensaio foram realizados troços com e sem corrente para se avaliar o efeito desta no cordão de soldadura e assim garantir que os ensaios com e sem corrente fossem submetidos às mesmas condições de operação. Nos primeiros quatro ensaios realizados as dimensões dos troços não foram definidas, apenas se dividiram os ensaios em 4 troços, dois com corrente e dois sem corrente, alternados entre si. Nos ensaios #5, #6 e #7 foi definido um critério para as distâncias dos troços. O cordão de soldadura foi dividido em 3 troços, isto é, inicia-se a soldadura sem corrente, ao fim de 70 mm faz-se passar pela ferramenta uma corrente durante mais 70 mm, passados esses 70 mm abre-se o circuito e a corrente deixa de passar pela ferramenta. Para a caracterização da temperatura ao longo do comprimento da chapa foram usados termopares nos ensaios #5, #6 e #7, mas as deficiências no sistema de fixação e a distância a que estavam do cordão deram origem a valores que podem não ser os reais.

Foi usada como fonte de alimentação uma bateria de automóvel 12 V 90 A/h 720 A. A bateria de automóvel provou ser uma boa escolha pois com as modificações na ferramenta e na montagem os valores de corrente obtidos foram da ordem dos 1000 A.

Antes de iniciar a soldadura foi feito um furo no início de cada cordão para impedir que a alma do pino sofresse algum tipo de dano ao penetrar nas chapas a soldar.

O critério utilizado para medir o comprimento saliente do pino ( $L_{pino}$ ) está ilustrado na Figura 5.4.

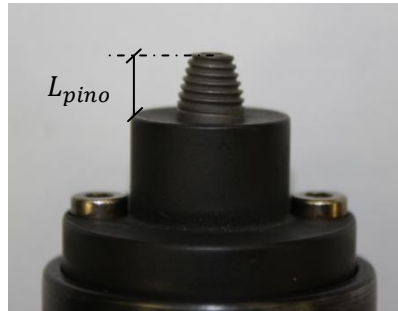


Figura 5.4- Critério utilizado para medir a altura do pino

A Tabela 5.3 descreve os parâmetros utilizados em cada ensaio. A velocidade de avanço ( $V$ ) e a velocidade de rotação ( $\Omega$ ) mantiveram-se constantes,  $V = 180 \text{ mm/min}$  e  $\Omega = 1120 \text{ rev/min}$ . O ângulo de inclinação da cabeça de fresadora foi de  $1.5^\circ$  para todos os ensaios.

Tabela 5.3- Parâmetros dos ensaios realizados na SFLAE

Ensaio nº.	Montagem	Comprimento saliente do pino (mm)
#1	I	3.4
#2	I	3.4
#3	I	3.4/3.2
#4	I	3.4/3.2
#5	II	3.8
#6	III	3.5/3.6
#7	III	3.3/3.4

Nos primeiros seis ensaios como alma do pino foi usado fio condutor unifilar de cobre de 3mm de diâmetro. Devido a diversas dificuldades com este material, no último ensaio foi usada uma alma de inox também com 3mm de diâmetro, este problema será abordado mais em detalhe no capítulo dos resultados.

No fim dos ensaios #4, #5 e #6 foi necessário realizar a retificação da base, pois o alumínio ficou encastrado na tira de cobre e também devido à dilatação térmica ocorrida durante o processo. A dilatação térmica provocou uma ascensão da tira de cobre, sendo esta mais acentuada na parte final da base.

## 5.5 Análise Metalográfica

Após a realização das soldaduras, estas foram cortadas transversalmente para obtenção de amostras de diferentes zonas do cordão de soldadura. Após a operação de corte, as amostras foram embutidas em resina para análise metalográfica.

Esta análise teve como objetivo perceber qual a influência que a corrente elétrica teve ao passar pela chapa, o aspeto dos cordões obtidos e a extensão das zonas afetadas termicamente.

Todas as análises quer macrográficas quer micrográficas foram realizadas em microscópio ótico Olympus modelo CX40RF200 com uma fonte de iluminação Olympus TH3. Na Figura 5.5 pode observar-se o equipamento laboratorial utilizado. Para a preparação das amostras foi usado o seguinte procedimento, depois de embutidas em resina as amostras foram polidas utilizando uma polidora Buehler Phoenix Alpha. Depois do polimento todas as amostras foram contrastadas com o reagente Dix-Keller, com a seguinte composição: 190 ml  $H_2O$ , 5 ml  $HNO_3$  (65%), 3 ml HCL (32%) e 2 ml HF (40%).

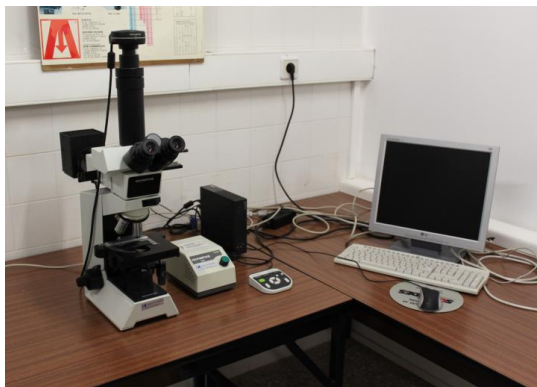


Figura 5.5- Microscópio ótico Olympus CX40RF200e fonte de iluminação Olympus TH3.

Para obtenção das amostras foi utilizado o seguinte critério, lado em avanço para a direita na secção que se pretendia observar.

Nos ensaios das tentativas preliminares de eliminação do defeito foi retirada uma amostra de cada ensaio. Para os ensaios de SFLAE, nos ensaios #3 e #4 realizaram-se 7 macrografias, foram retiradas duas amostras da primeira zona com corrente e duas de ambas as zonas sem corrente, na última zona com corrente apenas se retirou uma amostra. Nos restantes ensaios realizaram-se 6 amostras, duas de cada zona uma vez que nestes ensaios foi eliminada a segunda zona de passagem de corrente.

## 5.6 Ensaios de Dureza

Os ensaios de dureza foram realizados com recurso um micro durometro modelo HM-112 da marca Mitotoyo (Figura 5.6).

Para a realização das micro indentações foi usada uma carga de 200 g e um espaçamento de 1 mm entre micro indentações. Usaram-se dois procedimentos para estes ensaios, num realizaram-se dois perfis de dureza à distância da raiz do cordão de 255  $\mu\text{m}$  e 2 mm respetivamente. O outro procedimento consistiu em realizar 3 perfis de dureza à distância de 305  $\mu\text{m}$ , 1 mm e 2 mm respetivamente. O primeiro procedimento foi utilizado no ensaio #4 (BoP), o segundo foi realizado nos restantes ensaios (#3, #6 e #7).



Figura 5.6- Micro durometro Mitotoyo HM-112

## 5.7 Ensaios de Medição de Condutividade Elétrica

As amostras foram caracterizadas com base na medição da condutividade elétrica, usando duas sondas *Pencil Probe* de correntes induzidas (CI) e um equipamento comercial de inspeção por CI, Olympus Nortec 500 [38]. Na Figura 5.7 apresenta-se o aparato laboratorial utilizado.

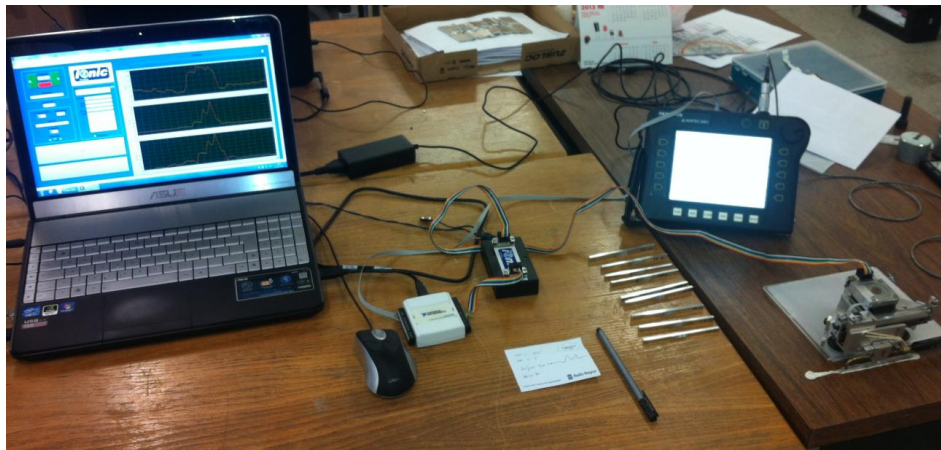


Figura 5.7- Aparato laboratorial

As *Pencil Probe* utilizadas foram a sonda Nortec P/ 100 KHz - 500 KHz /A/ 90.5/6, S/N R07471 para os perfis de condutividade e a sonda Olympus SP0 - 887L 60KHz, S/N S15684 para medir pontualmente os valores de condutividade das amostras.

Para melhores resultados laboratoriais a *Pencil probe* Nortec P/ 100 KHz - 500 KHz /A/ 90.5/6, S/N R07471 foi acoplada a um dispositivo de movimentação automatizado, designado Mesa Delta [39]. Esta mesa possibilita a inspeção de provetes de pequena, média ou grande dimensão. É fixa através de ventosas o que possibilita a sua portabilidade e é de fácil transporte e de peso reduzido. Na Figura 5.8 apresenta-se uma fotografia da *Pencil Probe* acoplada à Mesa Delta.

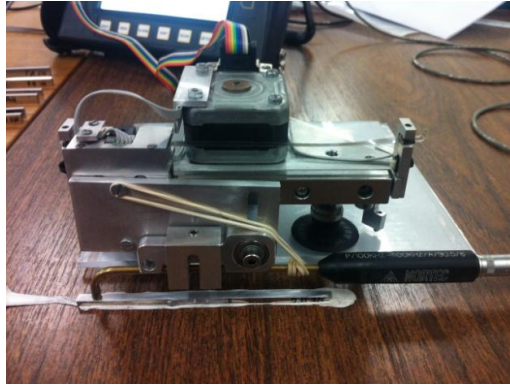


Figura 5.8- Mesa Delta e *Pencil Probe*

Antes de ser dado início ao procedimento experimental, o plano de impedâncias foi calibrado com o objetivo de dar maior relevância ao sinal da sonda no eixo dos  $\text{Im}(Z)$ , foi definido o valor do ganho e a resolução. Os parâmetros da inspeção utilizados estão descritos na Tabela 5.4.

Os valores adquiridos nestes testes referem-se à variação do valor imaginário ( $\text{Im}(Z)$ ) em relação ao valor referência.

Tabela 5.4- Parâmetros de teste utilizados nos ensaios com a sonda *Pencil Probe*

Parâmetros	
$f \text{ (kHz)}$	100, 250
Ganho (dB)	70
<i>Lift-off</i> ( $\mu\text{m}$ )	0
Varrimento (mm)	80
Direção	Foram realizados ensaios em ambas as direções (direita e esquerda) para validação dos resultados
Resolução ( $\mu\text{m}$ )	200

Para os ensaios de condutividade foi necessário realizar novas amostras, pois as amostras utilizadas nos restantes ensaios tinham dimensões muito reduzidas. Este facto impossibilitava uma boa aquisição de dados devido ao efeito de bordo e também não era possível adquirir o valor de condutividade do material base. Estas novas amostras foram

retiradas das zonas que sofreram as mesmas condições que amostras utilizadas na análise macrográfica e nos ensaios de dureza.

## **5.8 Síntese do Capítulo**

Neste capítulo apresentou-se toda a informação relativa às condições laboratoriais necessárias para a execução dos ensaios experimentais deste trabalho.

Efetuiu-se uma descrição dos materiais utilizados, assim como os parâmetros dos ensaios experimentais, primeiramente para os ensaios preliminares com material de sacrifício seguidos dos ensaios de SFLAE.

Apresentou-se toda a informação relativa às condições laboratoriais de inspeção, primeiramente o procedimento adotado para o processo de análise metalográfica, seguido do procedimento adotado para os ensaios de dureza e por fim os ensaios de condutividade.



## 6 Resultados e Discussão

### 6.1 Introdução

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios realizados. Primeiramente apresentam-se os resultados dos ensaios preliminares com material de sacrifício entre as chapas a soldar e a base e em seguida os resultados dos ensaios de SFLAE.

Nos ensaios com material de sacrifício, são apresentados os resultados da inspeção visual, e da análise macro e micrográfica realizados após cada ensaio.

Nos ensaios de SFLAE apresenta-se a inspeção visual, realizada após cada ensaio e respectivos gráficos de corrente e diferença de potencial, seguidos dos resultados da análise macrográfica e micrográfica, ensaios de dureza e de condutividade. São também discutidos os efeitos que o processo provocou na ferramenta durante o processo.

### 6.2 Ensaios Preliminares com Material de Sacrifício

Os ensaios da Montagem I acabaram por não produzir os efeitos desejáveis. Em nenhum dos ensaios se obtiveram soldaduras uniformes. No ensaio #1 (Figura 6.1) o resultado foi uma mistura entre o alumínio que estava a servir de base, as chapas que se estavam a processar e a chapa de aço.

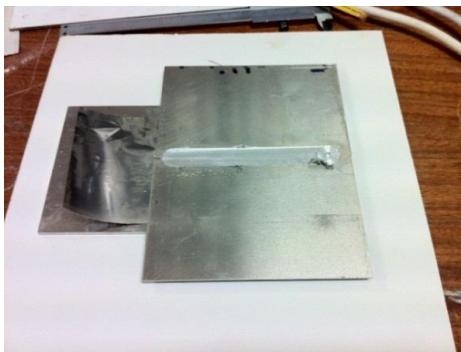


Figura 6.1- Resultado obtido no ensaio #1

No ensaio #2 e #3 (Figura 6.2) obtiveram-se juntas de fraca qualidade com muitos pontos onde não houve mistura de material, nestes ensaios houve uma mistura de fuligem e material processado devido ao material de sacrifício não ser adequado. Com o aumento da temperatura no decorrer do processo o material de sacrifício começou a queimar (Figura 6.2b e Figura 6.2d). Dos ensaios #1, #2 e #3 não foi feita análise metalográfica devido aos fracos resultados obtidos.

Os ensaios realizados com a montagem II também não produziram os resultados esperados. Na Figura 6.3 pode observar-se o resultado obtido no ensaio #6, o objetivo foi cumprido, ou seja, ao analisar a grafite é bem visível que o pino passou por todo o volume do material base, este facto é bem patente no negativo impresso na grafite (Figura 6.3b). Na raiz do cordão formou-se uma calota de grafite, esta calota foi facilmente removida pois só estava agarrada ao alumínio devido à pressão e ao calor envolvidos no processo. Houve um abatimento na zona da raiz do cordão, facto que se deveu à pouca rigidez apresentada pela grafite. Na Figura 6.3d) pode observar-se uma parte da calota de grafite já removida, constatou-se que depois de esta ter sido removida que o acabamento da raiz não era uniforme.

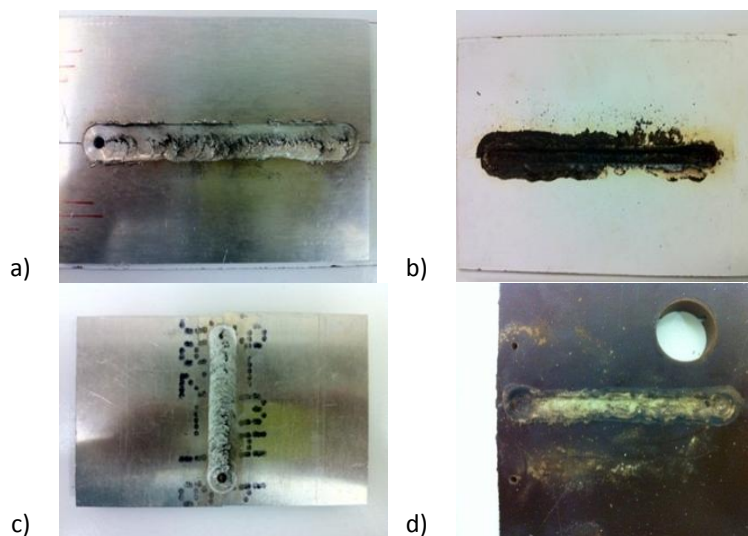


Figura 6.2- Resultados obtidos nos ensaios #2 e #3

- a) Cordão de soldadura do ensaio #2, b) Negativo que ficou impresso no platex, c) Cordão de soldadura do ensaio #3, c) Negativo que ficou impresso na baquelite.

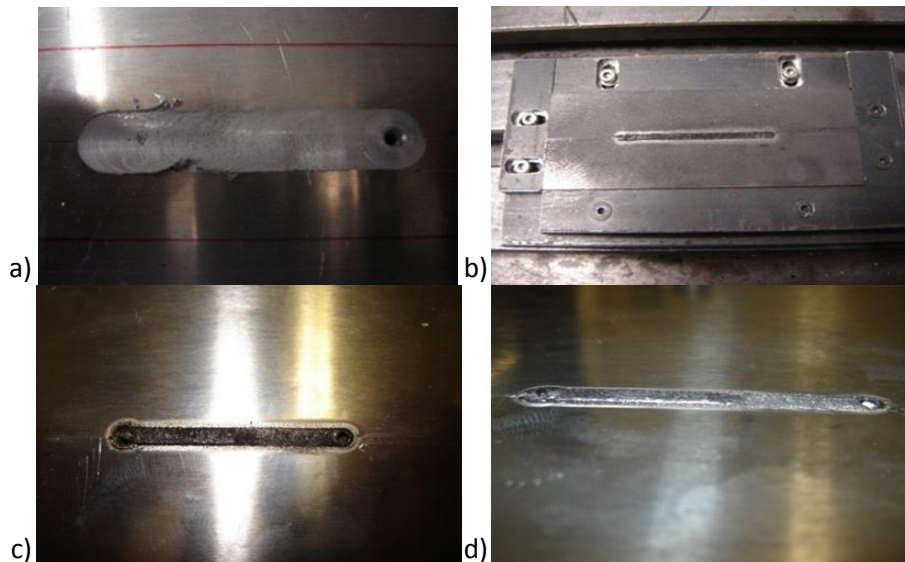


Figura 6.3- Resultado obtido no ensaio #6

a) Cordão de soldadura, b) Negativo impresso na grafite, c) Zona da raiz do cordão, d) Calota de grafite parcialmente removida.

Na Figura 6.4 apresenta-se a macrografia da secção transversal da amostra do ensaio #4, onde a mistura da grafite com o alumínio na zona da raiz está bem patente (Figura 6.4 a) e observa-se também o enorme abatimento (Figura 6.4 b) que decorreu devido ao facto da grafite não apresentar resistência suficiente para suportar as forças presentes no processo de SFL.

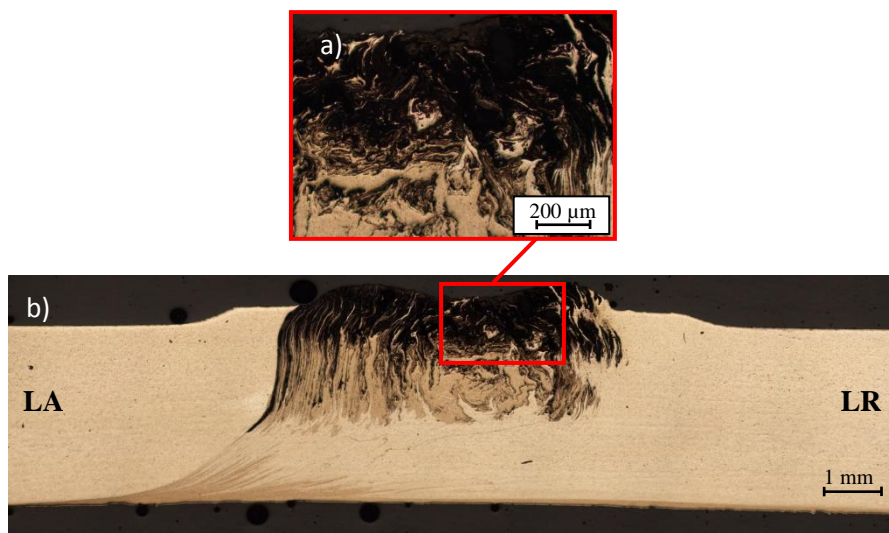


Figura 6.4- Macrografia da secção transversal da amostra do ensaio #4

a) Pormenor da mistura do alumínio com a grafite na zona da raiz, b) Macrografia do ensaio #4

Ao analisar os cordões produzidos com a montagem III constatou-se que produzia o mesmo acabamento que o obtido nos ensaios com a montagem II, ou seja os cordões produzidos não apresentavam uma zona da raiz uniforme e verificou-se um grande abatimento na zona da raiz do cordão. No ensaio #5 e #10 o pino roçou na chapa de aço o que levou a uma mistura de aço e alumínio no cordão resultante. Na Figura 6.5 apresenta-se a macrografia do ensaio #5 onde se pode observar a mistura de aço com o alumínio na zona da raiz (Figura 6.5 b), indicativo de que o pino passou a uma profundidade superior à espessura da chapa a soldar e da chapa de aço. Na Figura 6.5 c) e Figura 6.5 a) pode observar-se também a mistura do alumínio com a grafite na zona da raiz.

Visualmente os cordões produzidos pelos ensaios #9 (Figura 6.6) e #10 (Figura 6.7) apresentaram os melhores resultados de todos os ensaios, mas após a análise macrográfica constatou-se que os defeitos ainda estão presentes na raiz do cordão. Na Figura 6.7 a) apresenta-se uma ampliação da zona do *nugget* onde se pode observar que neste ensaio também houve uma mistura do alumínio com o material de sacrifício (chapa de aço). No ensaio #9 o pino não chegou a tocar na chapa de aço, mas também não passou por todo o volume das chapas a soldar.

Na Figura 6.8 pode observar-se as macrografias da secção transversal das amostras dos ensaios #6, #7. Nestes ensaios não se verificaram diferenças face aos resultados já apresentados. No ensaio #8 não foi realizada análise metalográfica pois o resultado já tinha sido observado.

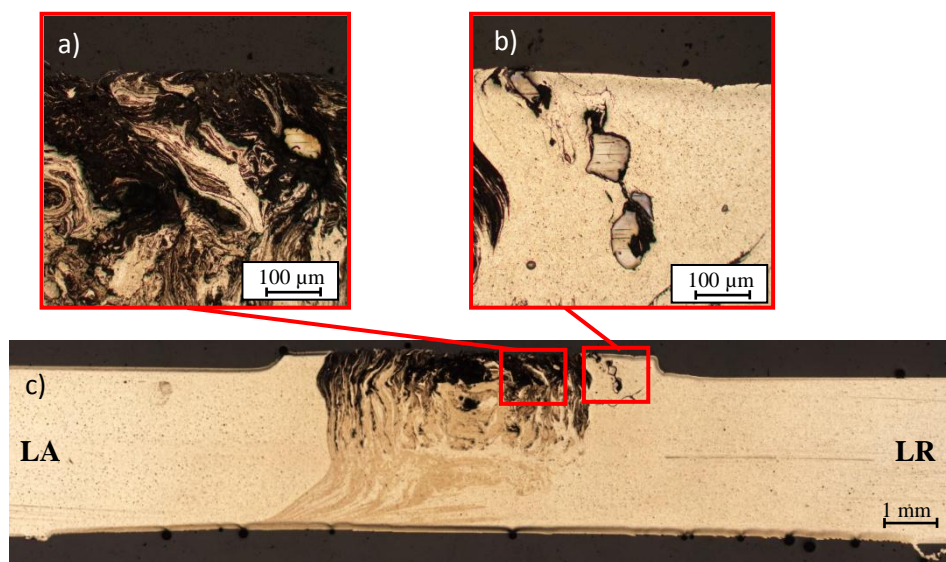


Figura 6.5- Macrografia da secção transversal da amostra do ensaio #5  
a) Pormenor da mistura do alumínio com a grafite, b) Pormenor da mistura do alumínio com o aço, c) Macrografia do ensaio #5



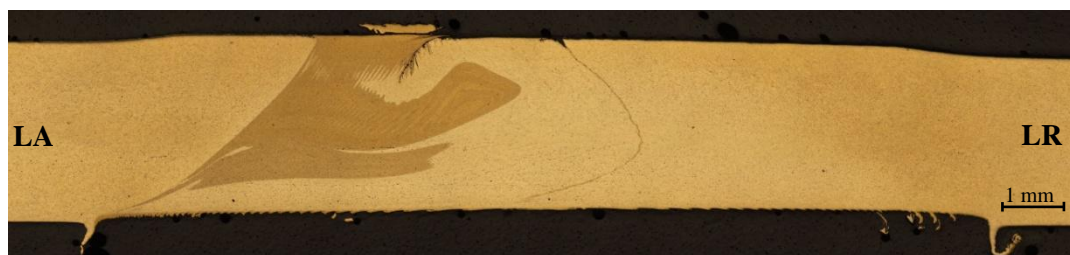


Figura 6.6- Macrografia da secção transversal da amostra do ensaio #9

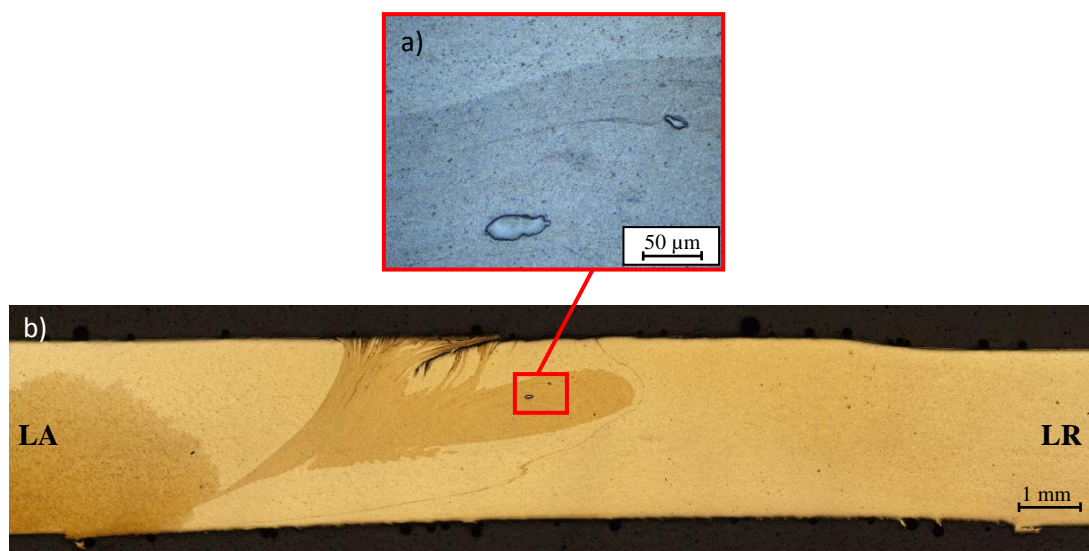


Figura 6.7- Macrografia da secção transversal da amostra do ensaio #10  
a) Pormenor da mistura do alumínio com o aço, b) Macrografia do ensaio #10

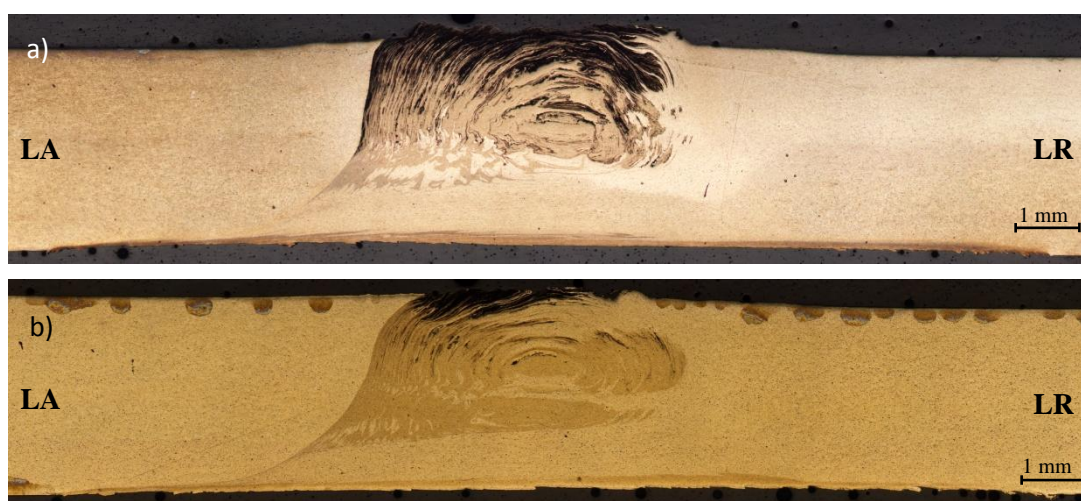


Figura 6.8- Macrografias da secção transversal das amostras dos ensaios #6 e #7  
a) Macrografia da secção transversal da amostra do ensaio #6, b) Macrografia da secção transversal da amostra do ensaio #7

## 6.3 Ensaios de SFLAE

### 6.3.1 Inspeção Visual

No ensaio #1 (Figura 6.9) foi usada a ferramenta SFLAE\_v1 e numa tentativa de isolamento elétrico desta foi utilizado um casquilho em Politetrafluoretileno (PTFE) entre o corpo da ferramenta e a pinça da fresadora. Este casquilho cedeu durante o ensaio devido às forças e temperaturas elevadas resultantes do processo de SFL dando origem a que se tivesse de parar ensaio. A passagem de corrente neste ensaio foi na ordem dos 760 A.

No ensaio #2 (Figura 6.10) não ocorreram problemas relacionados com a ferramenta mas sim com a fonte de alimentação. A passagem de corrente efetuada na montagem foi apenas de 25 A, longe dos 760 A conseguidos no primeiro ensaio. Visualmente conseguiu-se um cordão de soldadura estabilizado ao longo de todo o seu comprimento.

Devido aos problemas que ocorreram nestes dois ensaios não foi realizada análise metalográfica às amostras retiradas do cordão.

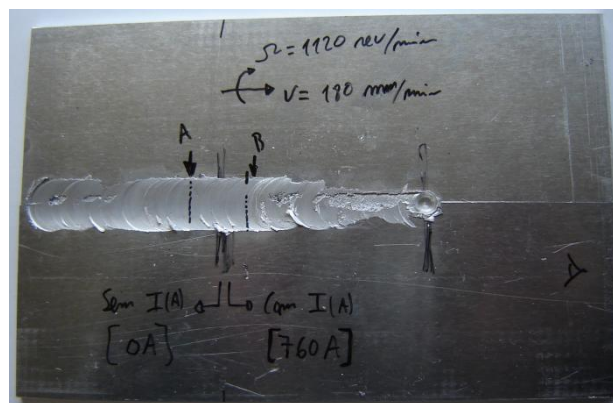


Figura 6.9- Resultado de ensaio #1.

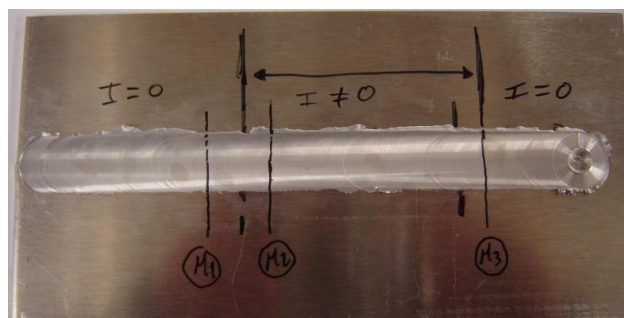


Figura 6.10- Resultado do ensaio #2.

No ensaio #3 todo o aparato experimental funcionou devidamente. Foram feitas duas passagens de corrente durante o processo, a primeira com aproximadamente de 800 A e a segunda com 700 A. Na Figura 6.11 apresenta-se uma fotografia do cordão de soldadura e os gráficos obtidos através dos parâmetros elétricos usados no ensaio. O cordão de soldadura apresenta uma zona estabilizada ao longo de todo o seu comprimento e não se verificam diferenças entre as zonas com e sem passagem de corrente. Devido à temperatura que se fez sentir durante o ensaio verificou-se que a parte final da tira de cobre encastrada na base de suporte sofreu uma ascensão devido à sua dilatação térmica. Este facto deu origem a uma depressão na zona da raiz, mais pronunciada na zona final do cordão.

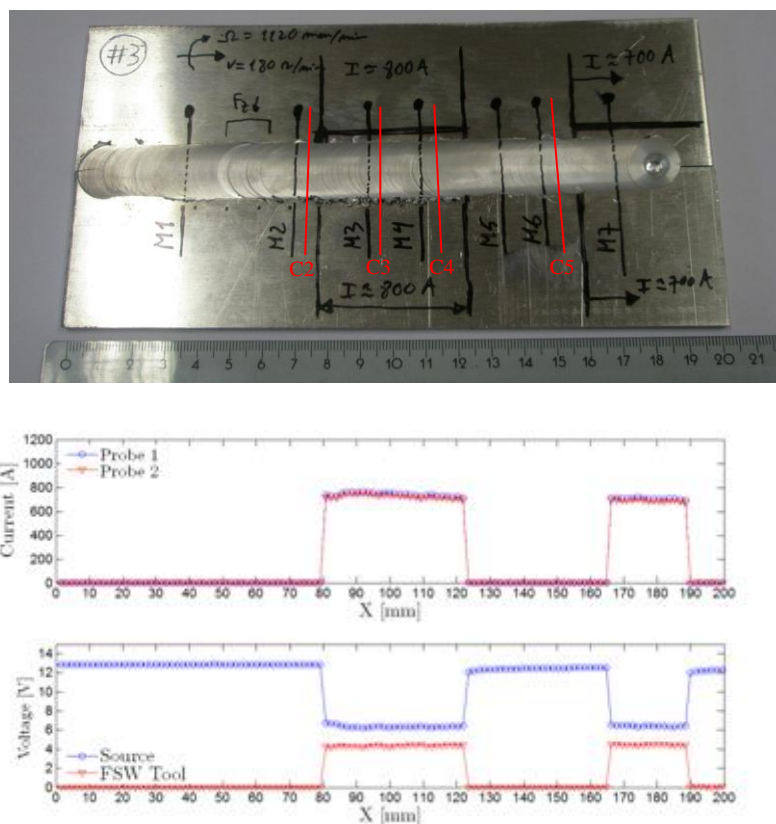


Figura 6.11- Soldadura resultante do ensaio #3 e respetivos gráficos de corrente e diferença de potencial

Na Figura 6.12 apresenta-se o resultado do ensaio #4. Este ensaio foi o que se designa por *Bead on Plate* (BoP), ou seja, apenas se utilizou uma chapa, não existindo assim nenhuma junta a soldar. O objetivo deste ensaio foi tentar compreender qual o efeito da corrente no processo. Fizeram-se duas passagens de corrente uma com aproximadamente 800 A e outra com 700 A. Neste ensaio voltou-se a verificar uma depressão na zona da raiz, mais pronunciada na parte final do cordão. O cordão de soldadura apresenta uma zona estável ao longo de todo o seu

comprimento e visualmente não se verificaram diferenças entre as zonas com e sem passagem de corrente.

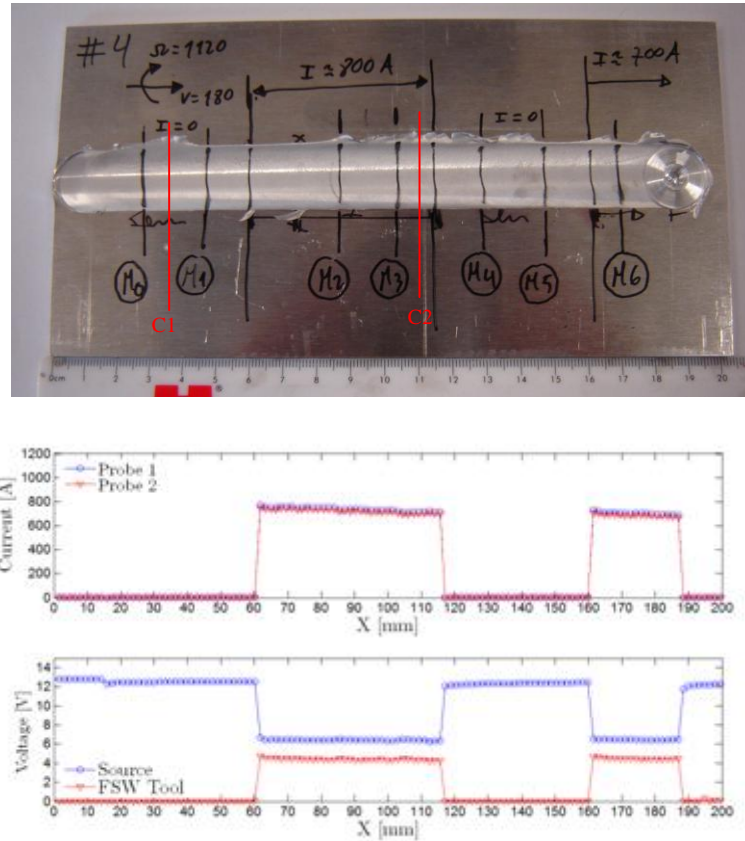


Figura 6.12- Soldadura resultante do ensaio #4 e respectivos gráficos de corrente e diferença de potencial

Na Figura 6.13 apresenta-se o resultado do ensaio #5. Foram feitas duas passagens de corrente, uma com aproximadamente 800 A e outra com 700 A. Neste ensaio o comprimento saliente do pino foi considerado excessivo uma vez que provocou um abatimento na zona da raiz. O cordão de soldadura apresenta uma zona estável ao longo de todo o seu comprimento e visualmente não se verificaram diferenças entre as zonas com e sem passagem de corrente.

Como foi dito anteriormente, com a montagem utilizada para fixar os termopares não foi possível adquirir resultados exatos das temperaturas nos diversos pontos pois a distância que estes tinham do cordão de soldadura era grande e o sistema de fixação não permitiu constrangê-los de maneira a obter uma leitura exata.



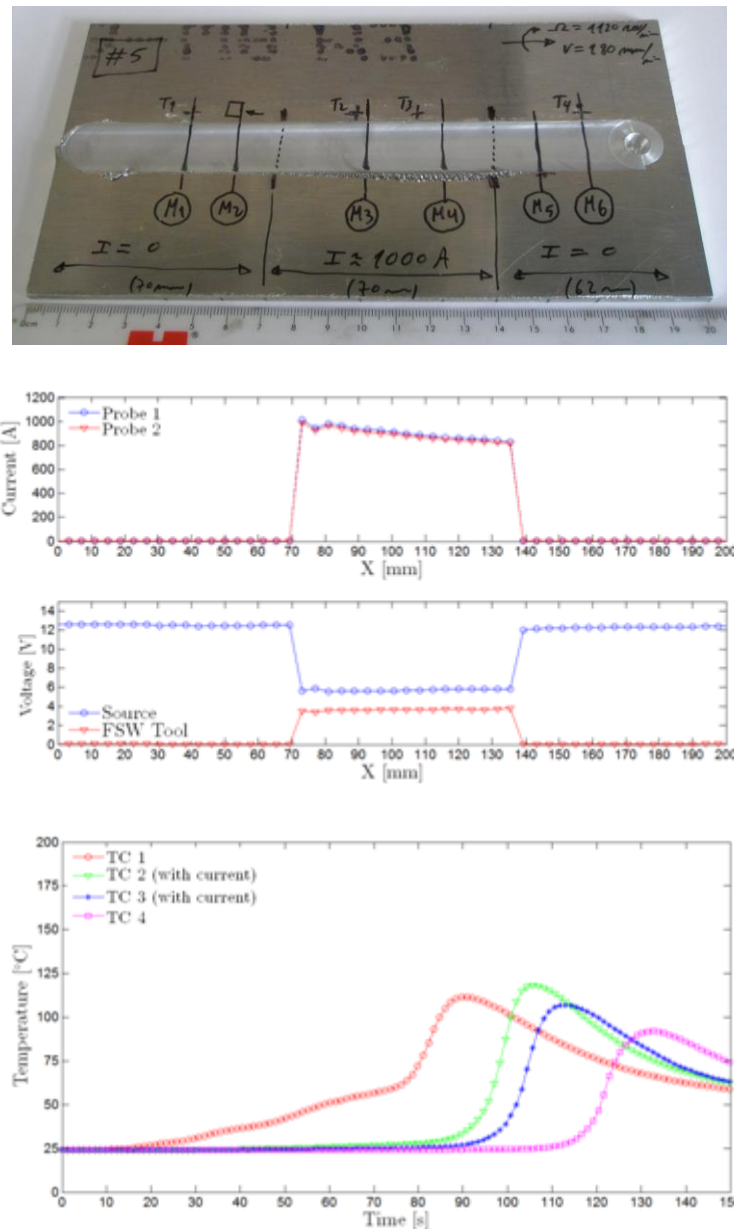


Figura 6.13- Soldadura resultante do ensaio #5, respetivos gráficos de corrente e diferença de potencial e gráfico com os valores das temperaturas obtidas em cada termopar

Na Figura 6.14 apresenta-se o resultado do ensaio #6. Neste ensaio foi feita uma passagem de corrente com aproximadamente 1000 A. O facto de a corrente aumentar provou que as alterações feitas à ferramenta e à montagem fizeram efeito. Devido à temperatura que se fez sentir durante o ensaio verificou-se que a parte final da tira de cobre sofreu mais uma vez uma ascensão, o que originou a uma depressão na zona da raiz mais pronunciada na zona final do cordão. O cordão de soldadura apresenta uma zona estável ao longo de todo o seu comprimento e visualmente não se verificaram diferenças entre as zonas com e sem passagem de corrente.

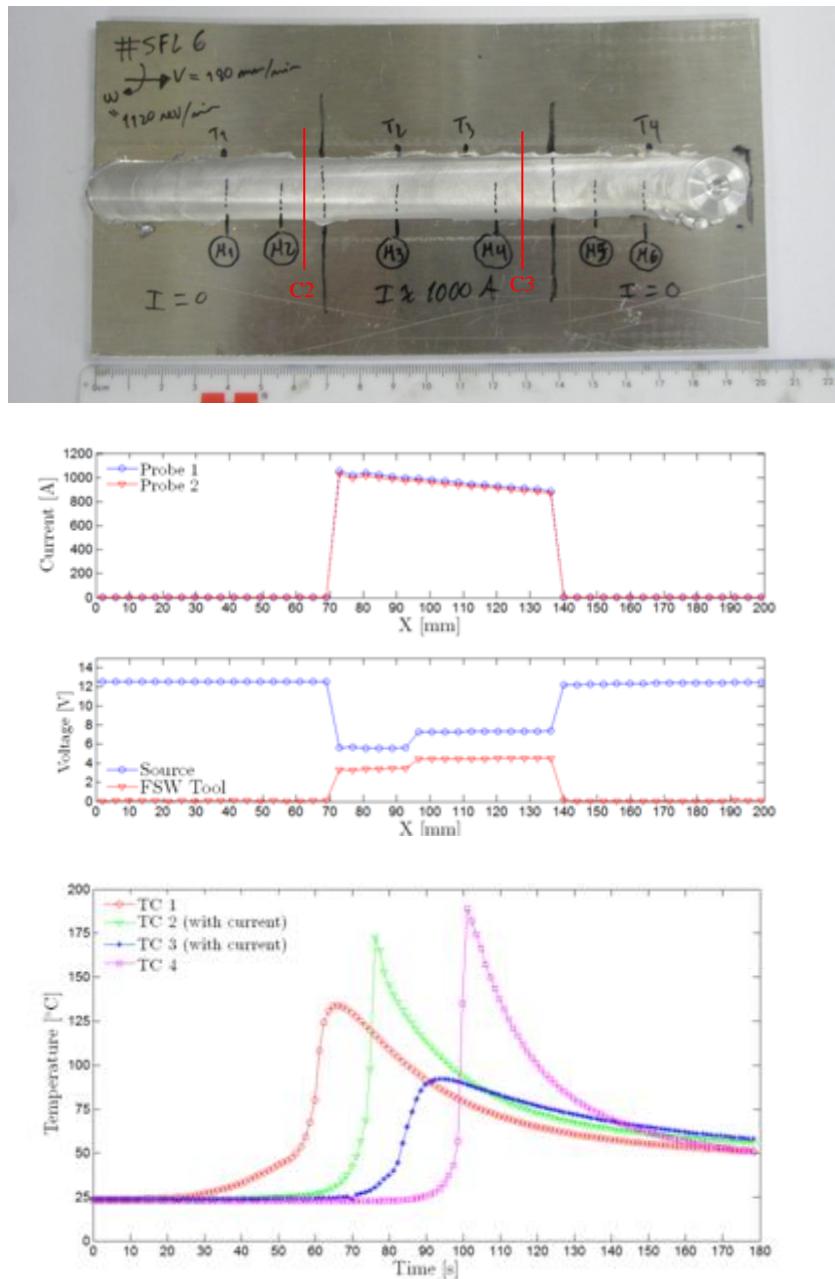


Figura 6.14- Soldadura resultante do ensaio #6, respectivos gráficos de corrente e diferença de potencial e gráfico com os valores das temperaturas obtidas em cada termopar

Na Figura 6.15 apresenta-se o resultado do ensaio #7. Neste ensaio foi feita uma passagem com aproximadamente 1000 A. O cordão de soldadura apresenta uma zona estável ao longo de todo o seu comprimento e visualmente não se verificaram diferenças entre as zonas com e sem passagem de corrente.

Neste ensaio verifica-se um resultado inesperado que foi o de que apesar de o comprimento saliente do pino ser bastante baixo, ao nível do ensaio #3 o resultado obtido não foi o mesmo. Em vez de uma depressão na zona da raiz provocada pela ascensão da tira de cobre houve um abatimento da mesma a partir da zona onde se iniciou a descarga de corrente.

No cordão observam-se algumas zonas onde este apresenta outra coloração, este facto deve-se à mistura da cola que prendeu os termopares com alumínio durante o processo.

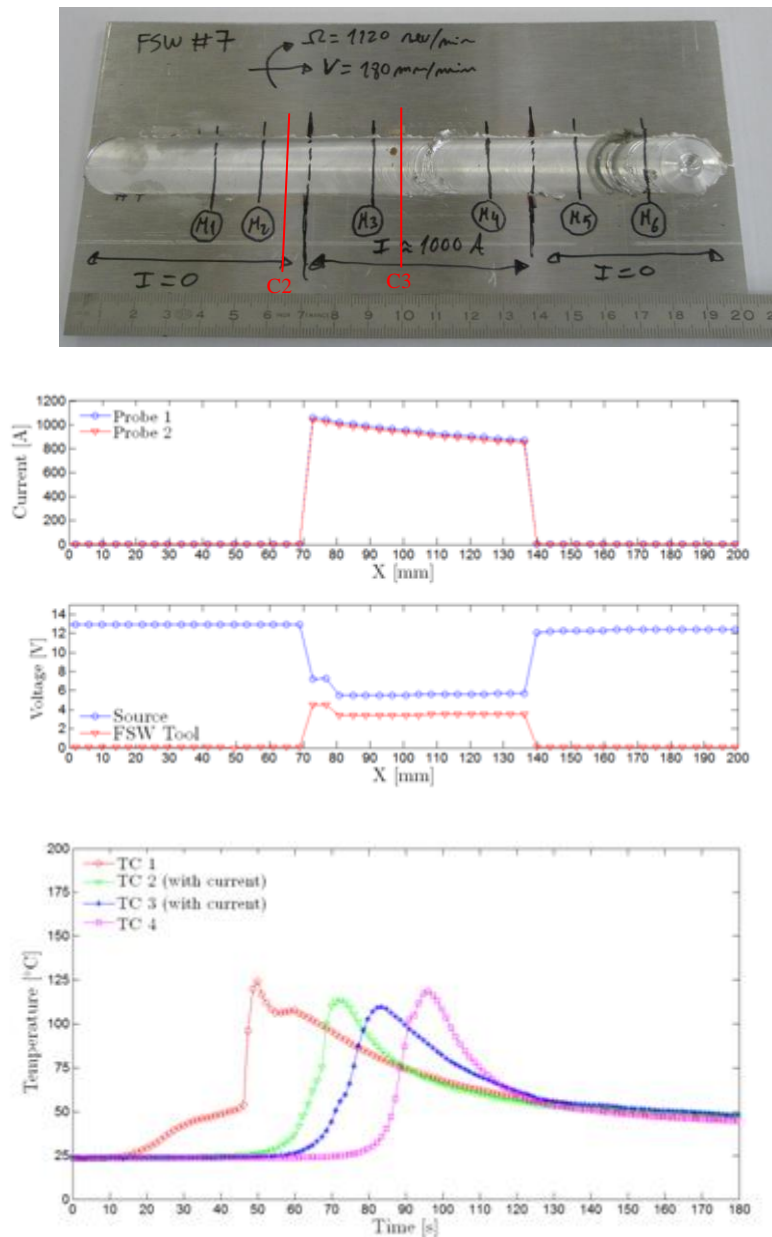


Figura 6.15- Soldadura resultante do ensaio #7, respetivos gráficos de corrente e diferença de potencial e gráfico com os valores das temperaturas obtidas em cada termopar

Em todos os ensaios verificou-se o defeito de produção de apara, este defeito deve-se aos ensaios terem sido realizados numa fresadora convencional onde não se tem a possibilidade de controlar a força axial vertical.

Com o decorrer dos ensaios a ferramenta sofreu alguns efeitos inesperados. Na ferramenta SFLAE\_v1 e SFLAE\_v2 as anilhas isolantes de baquelite sofreram uma redução de espessura e mudaram de cor sentindo-se um intenso cheiro a queimado após cada ensaio.

Na Figura 6.16 pode observar-se essa mudança de cor, à esquerda encontra-se a anilha que foi usada na ferramenta e à direita uma anilha que não chegou a ser usada. Outro dos efeitos resultantes do processo foi o de a extremidade da alma do pino em cobre apresentar no final dos ensaios uma concavidade (Figura 6.17 a). Na Figura 6.17 b) pode observar-se a alma do pino retirada da ferramenta após o ensaio #6 em que é bem evidente a concavidade da mesma. No último ensaio numa tentativa de resolver este problema foi utilizada uma alma do pino em inox e este efeito já não se fez sentir, na Figura 6.17 c) pode observar-se isso mesmo.



Figura 6.16- Anilhas isolantes

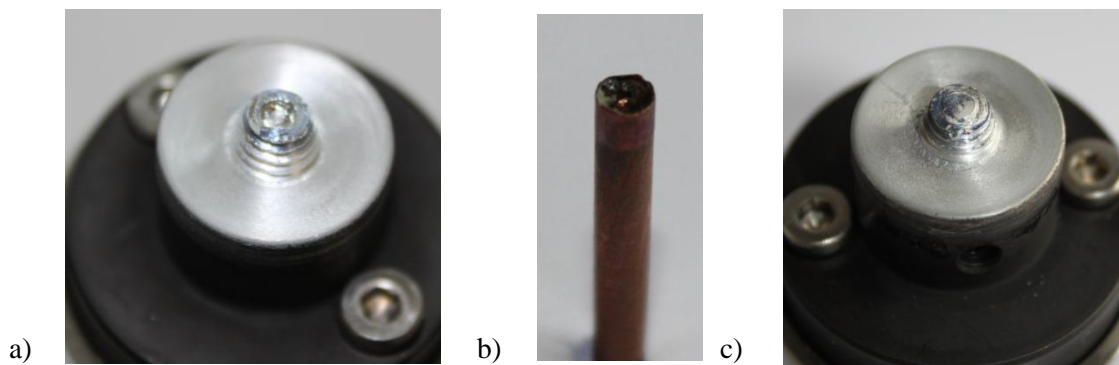


Figura 6.17- Efeito do processo na alma do pino

- a) Ferramenta com alma do pino em cobre, b) Alma do pino em cobre com a concavidade em evidência, c) Ferramenta com alma do pino em inox

### 6.3.2 Análise Metalográfica

De uma forma geral a análise metalográfica não evidencia diferenças entre as amostras retiradas das zonas com e sem passagem de corrente. Este facto pode dever-se a algumas deficiências presentes no sistema de fixação das chapas e na ferramenta.

O ensaio #3 foi o que mostrou os melhores resultados, verifica-se que houve uma redução do defeito na zona com passagem de corrente. Na Figura 6.18 pode observar-se as macrografias da secção transversal das amostras M2 (Figura 6.18 b) e M3 (Figura 6.18 d) onde se observa a redução do defeito. Esta redução não foi em termos de altura mas sim em espessura, passando o defeito de 15,53  $\mu\text{m}$  na zona sem passagem de corrente (Figura 6.18 a) para 3.37  $\mu\text{m}$  na zona com passagem de corrente (Figura 6.18 c).

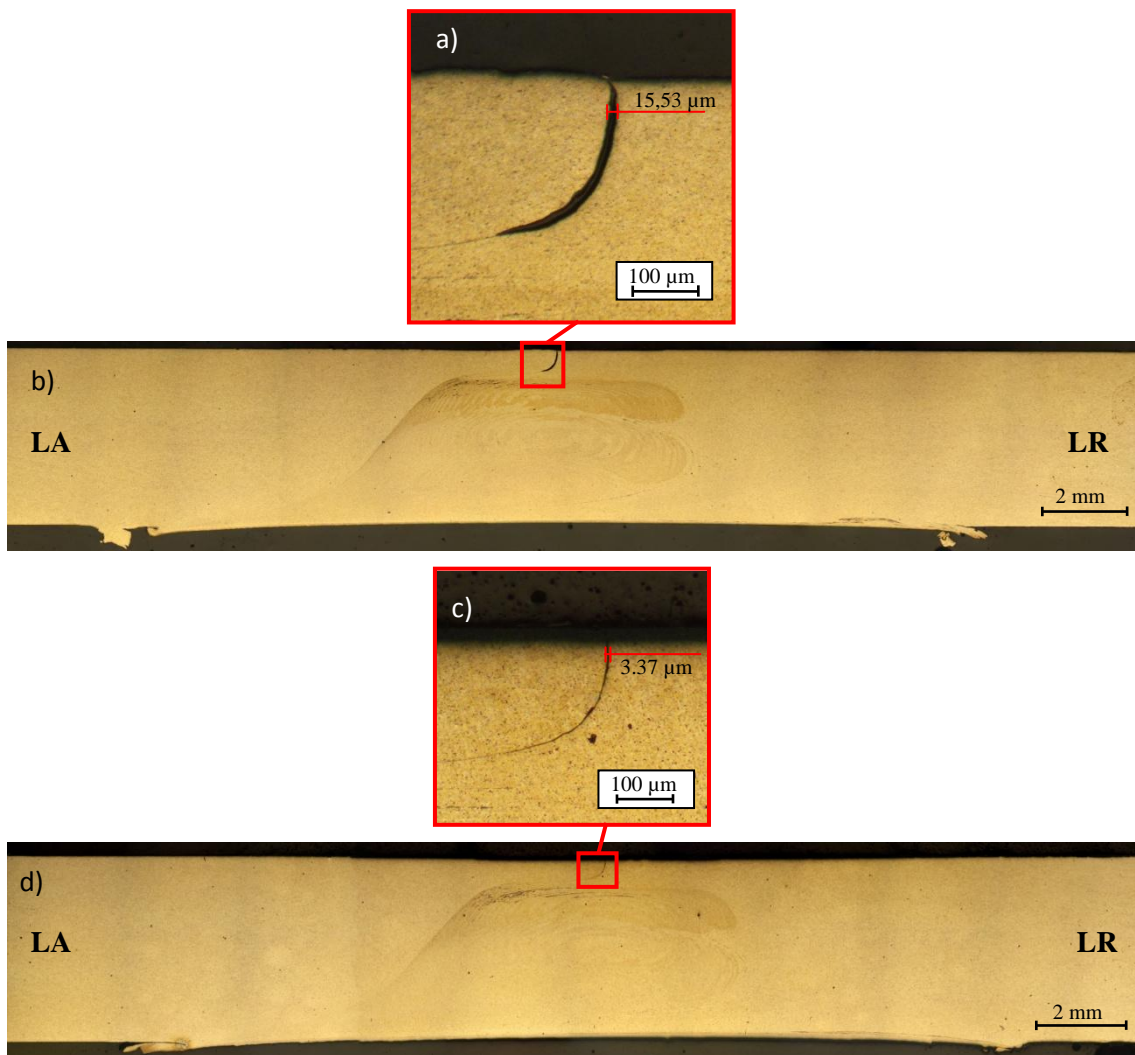


Figura 6.18- Macrografias da secção transversal das amostras do ensaio #3  
a) Pormenor do defeito na zona da raiz, b) Macrografia da amostra M2, c) Pormenor do defeito na zona da raiz, d) Macrografia da amostra M3

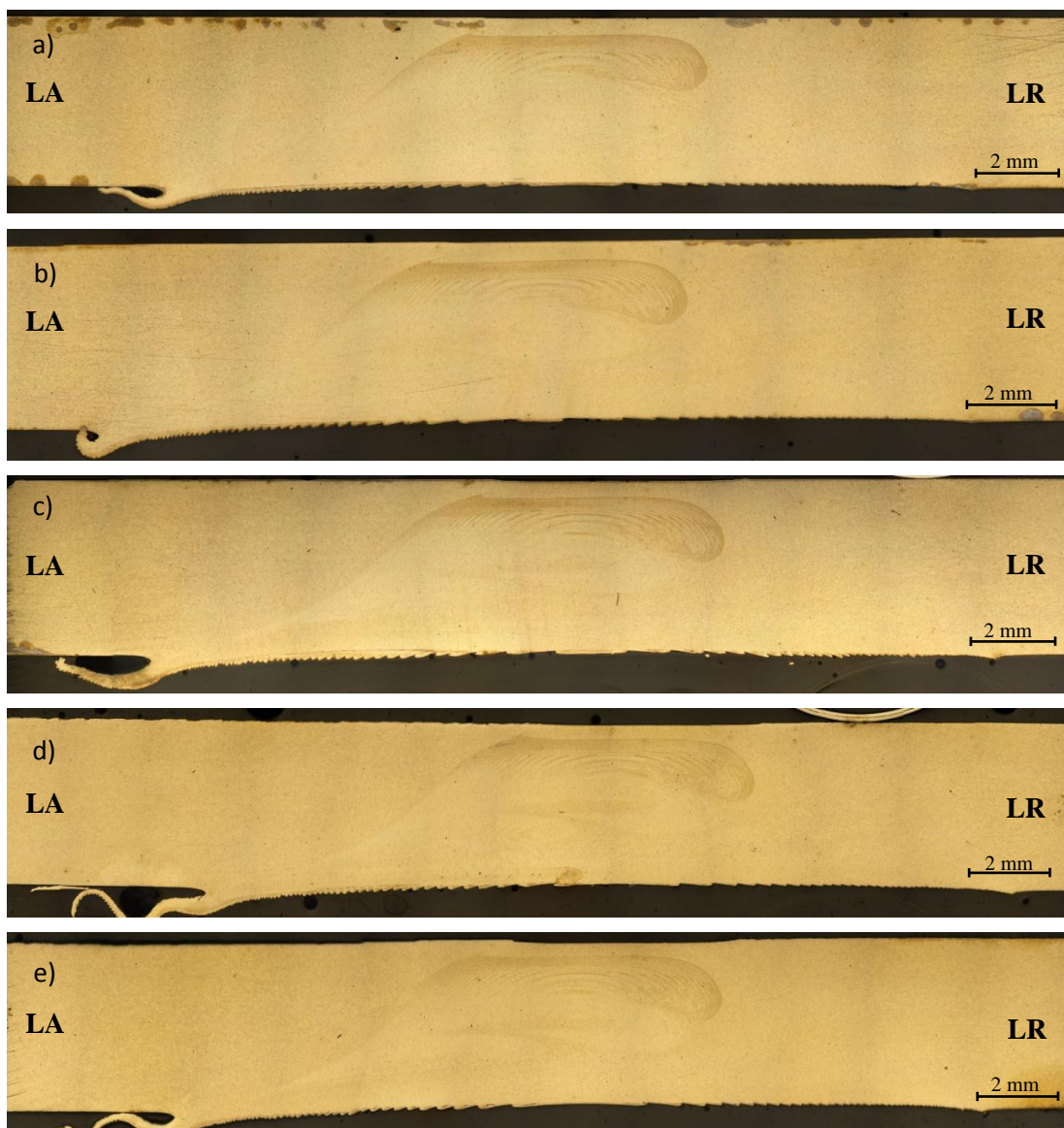


Na Figura 6.19 apresentam-se as restantes imagens das macrografias realizadas no ensaio #3. Da análise destas macrografias pode constatar-se que a macrografia da amostra M6 (Figura 6.19 d) não obedece ao padrão descrito, isto é, o defeito é de espessura reduzida mas esta amostra foi retirada de uma zona sem passagem de corrente. Este facto pode dever-se à ascensão da tira de cobre já descrito anteriormente e consequente diminuição de espessura da chapa na zona da junção. Na macrografia da amostra M1 (Figura 6.19 a) pode observa-se no lado em avanço, nos limites do *nugget* um conjunto de defeitos das quais não foi possível determinar a sua origem. As restantes macrografias respeitam o padrão descrito. M4 (Figura 6.19 b) e M7 (Figura 6.19 e), ambas as amostras retiradas de zonas de passagem de corrente apresentam defeitos de reduzida dimensão comparativamente a M5 (Figura 6.19 c), que foi retirada de uma zona sem passagem de corrente.



Figura 6.19- Macrografias da secção transversal das amostras do ensaio #3  
a) Macrografia da amostra M1, b), Macrografia da amostra M4, c) Macrografia da amostra M5,  
d) Macrografia da amostra M6, e) Macrografia da amostra M7

Na Figura 6.20 apresentam-se as imagens das macrografias realizada no ensaio #4 (BoP). Nestas imagens não se evidencia nenhuma diferença entre as amostras retiradas da zona sem passagem de corrente, M0 (Figura 6.20 a), M1 (Figura 6.20 b), M4 (Figura 6.20 e), M5 (Figura 6.20 f) e da zona com passagem de corrente, M2 (Figura 6.20 c), M3 (Figura 6.20 d) e M6 (Figura 6.21). Na Figura 6.21 apresenta-se a macrografia da amostra M6 do ensaio #4, esta apresenta um defeito conhecido como vazio (Figura 6.21 a) e também apresenta um conjunto de defeitos (Figura 6.21 b), os quais não foi possível identificar a sua causa de aparecimento. Também é possível observar que neste ensaio as chapas não ficaram alinhadas com a tira de cobre encastrada na base de suporte.



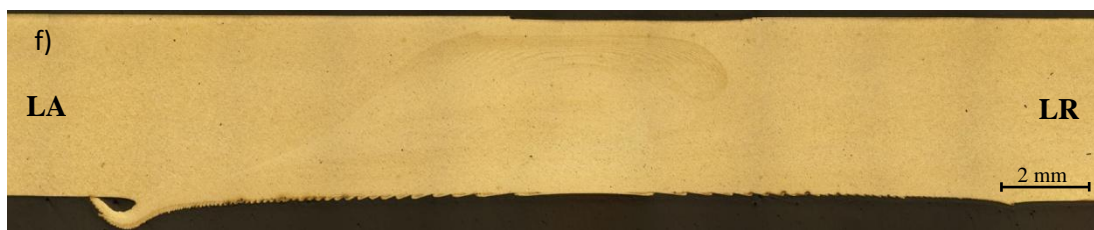


Figura 6.20- Macrografias da secção transversal das amostras do ensaio #4  
a) Macrografia da amostra M0, b), Macrografia da amostra M1, c) Macrografia da amostra M2,  
d) Macrografia da amostra M3, e) Macrografia da amostra M4, f) Macrografia da amostra M5

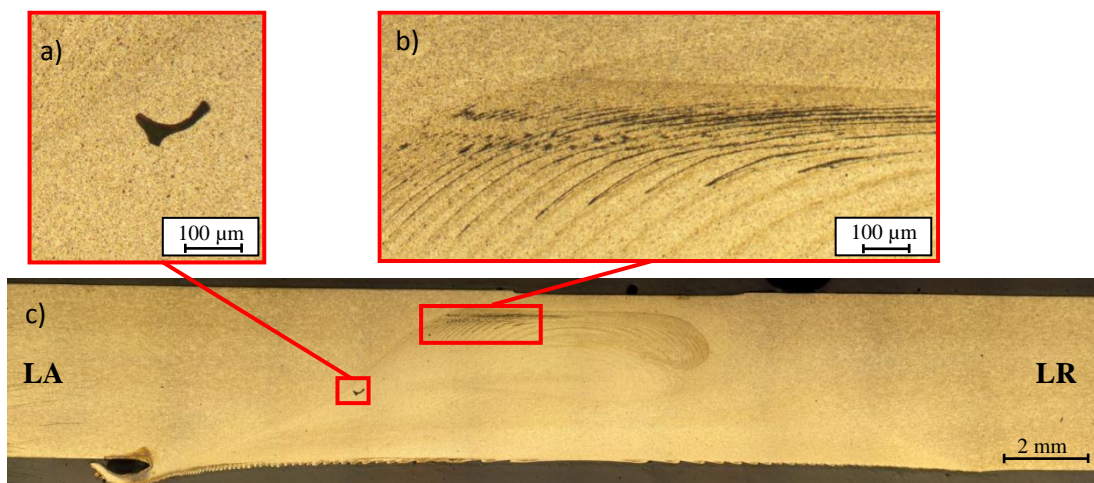


Figura 6.21- Macrografia da secção transversal da amostra M6 do ensaio #4  
a) Defeito conhecido como vazio, b) Defeitos na zona do *nugget*, c) Macrografia da amostra M6

Na Figura 6.22 apresentam-se as macrografias da secção transversal do ensaio #5. Devido a um comprimento saliente do pino excessivo, verificou-se que houve um grande abatimento na zona da raiz. Devido a este facto, o defeito na raiz do cordão foi eliminado mas como o comprimento saliente do pino era excessivo, este provocou dano na base de suporte. Na zona da raiz do cordão do lado em avanço as macrografias M1 (Figura 6.22 a), M3 (Figura 6.22 c) e M4 (Figura 6.22 d) apresentam mesmo tipo de defeito descrito anteriormente. Neste ensaio não se evidenciam diferenças entre as amostras retiradas das zonas com e sem passagem de corrente.

Na Figura 6.23 apresenta-se a macrografia da secção transversal da amostra M1 do ensaio #6. Nesta macrografia é possível observar partículas de cobre na zona da raiz (Figura 6.23 a), estas provocaram vários defeitos nesta zona. Estas partículas de cobre misturadas com o alumínio resultam de o comprimento saliente do pino ainda ser excessivo e roçar na tira de cobre encastrada na base. Na Figura 6.24 apresentam-se as restantes macrografias realizadas no ensaio #6 e verifica-se que todas elas apresentam o defeito referido. Verifica-se também o defeito provocado pela ascensão da tira de cobre encastrada na base de suporte. Neste ensaio não ocorreu o defeito na raiz *LOP*, mas sim alinhamento de óxidos, estes não apresentam



diferenças nas amostras retiradas nas zonas com passagem de corrente e sem passagem de corrente.

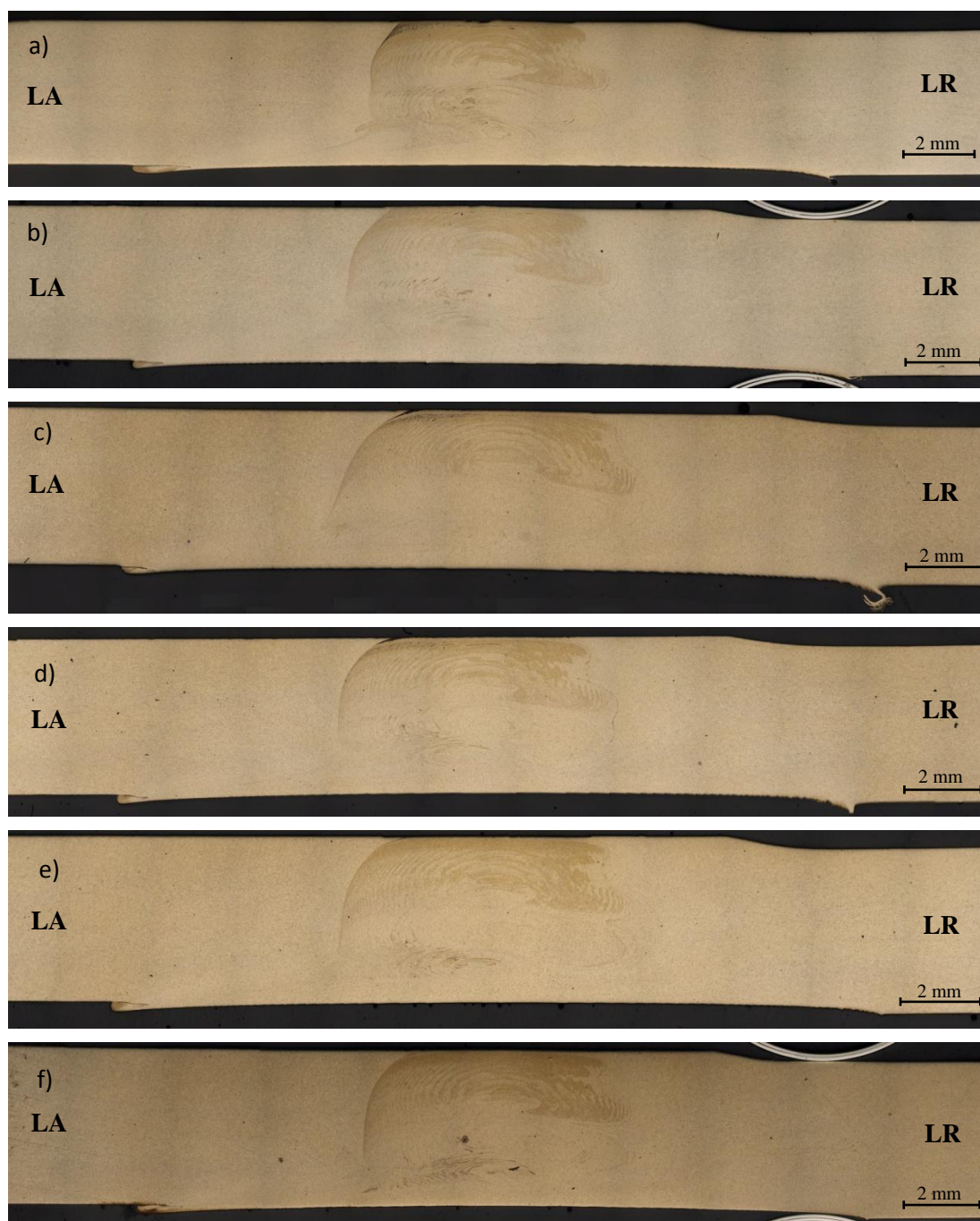


Figura 6.22- Macrografias da secção transversal das amostras do ensaio #5

a) Macrografia da amostra M1, b), Macrografia da amostra M2, c) Macrografia da amostra M3, d) Macrografia da amostra M4, e) Macrografia da amostra M5, f) Macrografia da amostra M6



Figura 6.23- Macrografia da secção transversal da amostra M1 do ensaio #6  
a) Pormenor da zona da raiz, b) Macrografia da amostra M1

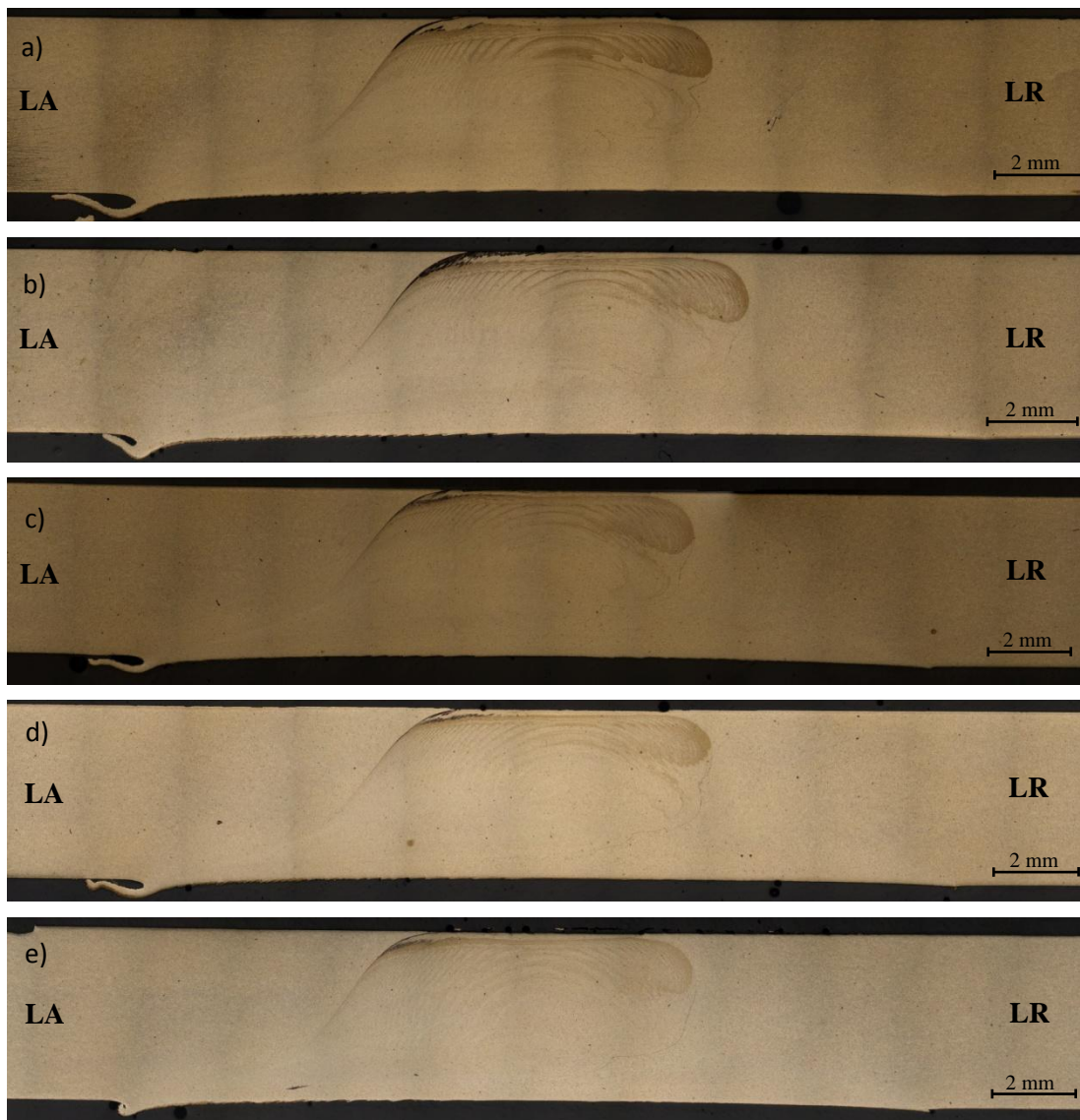


Figura 6.24- Macrografias da secção transversal das amostras do ensaio #6  
a) Macrografia da amostra M2, b), Macrografia da amostra M3, c) Macrografia da amostra M4,  
d) Macrografia da amostra M5, e) Macrografia da amostra M6



Na Figura 6.25 apresenta-se o conjunto de imagens das macrografias do ensaio #7, pode observar-se o aspeto referido em §6.3.1 de ter ocorrido um abatimento na zona da raiz em vez de uma depressão como nos restantes ensaios. Este defeito pode resultar de várias causas. A mudança da alma do pino, pois neste ensaio foi usada uma alma do pino em inox, ou então o facto de a base de suporte ter sofrido sucessivos ciclos térmicos ao longo do trabalho, o que pode ter originado com que a tira de cobre encastrada não estivesse bem assente na base de aço e durante o processo devido as forças envolvidas esta pode ter sofrido um deslocamento causando assim o abatimento da zona da raiz do cordão. Quanto ao defeito da raiz este não apresenta modificações entre as amostras retiradas da zona com passagem de corrente e sem passagem de corrente. Na Figura 6.26 apresentam-se as macrografias das amostras M4 (Figura 6.26 b) e M5 (Figura 6.26 d), onde se observam os defeitos na raiz (Figura 6.26 a e Figura 6.26 c). Estes defeitos caracterizam-se por um defeito LOP devido à fraca deformação plástica, seguido de um alinhamento de óxidos.



Figura 6.25- Macrografias da secção transversal das amostras do ensaio #7  
a) Macrografia da amostra M1, b) Macrografia da amostra M2, c) Macrografia da amostra M3,  
d) Macrografia da amostra M6

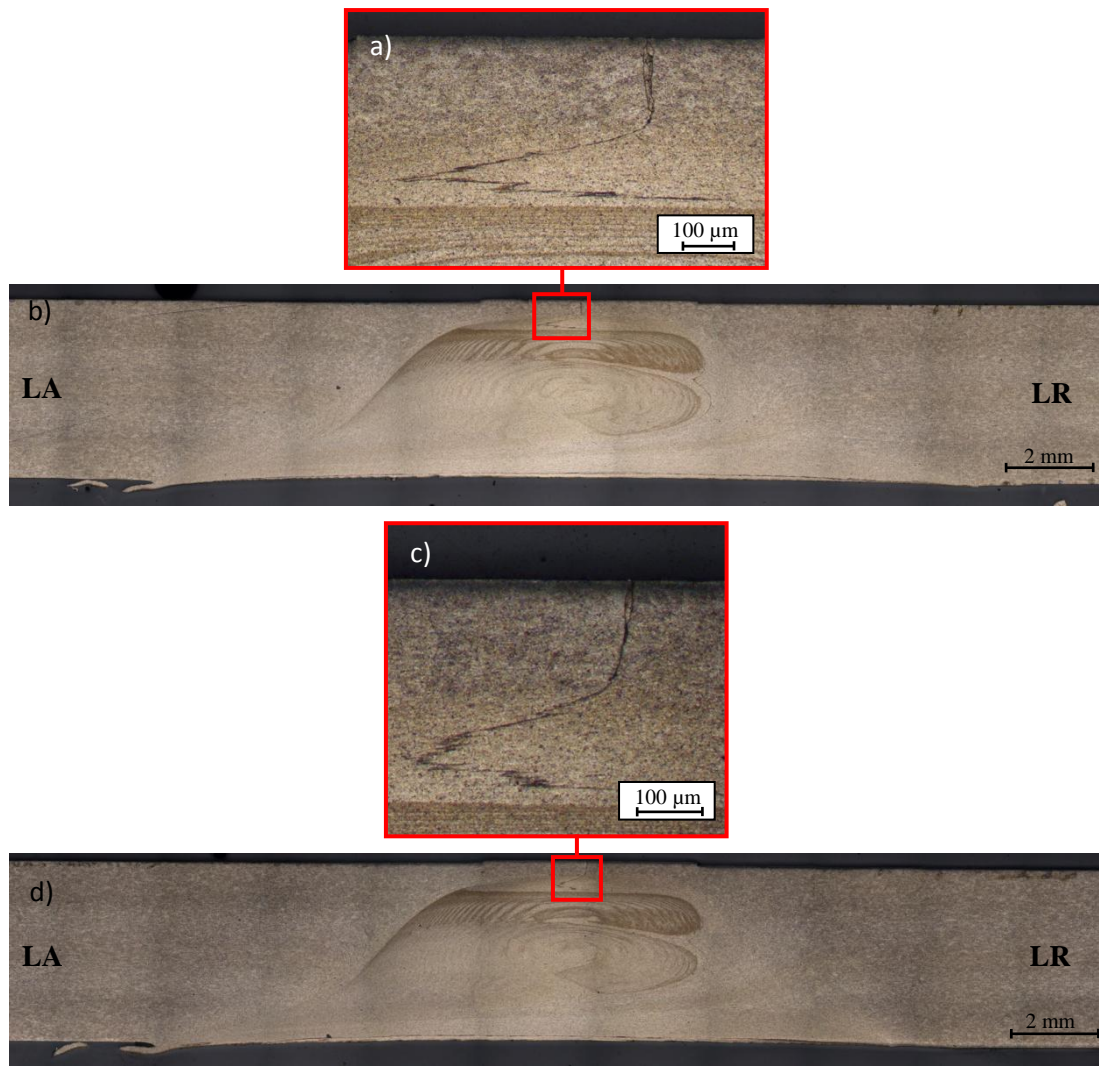


Figura 6.26- Macrografias da secção transversal das amostras do ensaio #7  
a) Pormenor do defeito na zona da raiz, b) Macrografia da amostra M4, c) Pormenor do defeito na zona da raiz, d) Macrografia da amostra M5

### 6.3.3 Ensaios de Dureza

Foram realizados ensaios de dureza, pois estes fornecem uma ligação entre as propriedades metalúrgicas qualificáveis e as propriedades mecânicas quantificáveis das juntas soldadas. Foram obtidos perfis de dureza nas condições descritas em § 5.7. Na Figura 6.27 apresenta-se o ensaio de dureza realizado na amostra M2 do ensaio #3.

Da análise dos resultados presentes na Figura 6.27 verifica-se que o *nugget* do cordão de SFL apresenta valores de dureza inferiores ao material base com um valor mínimo na interface da zona afetada Termo mecanicamente. (ZATM) e a zona afetada pelo calor (ZAC).

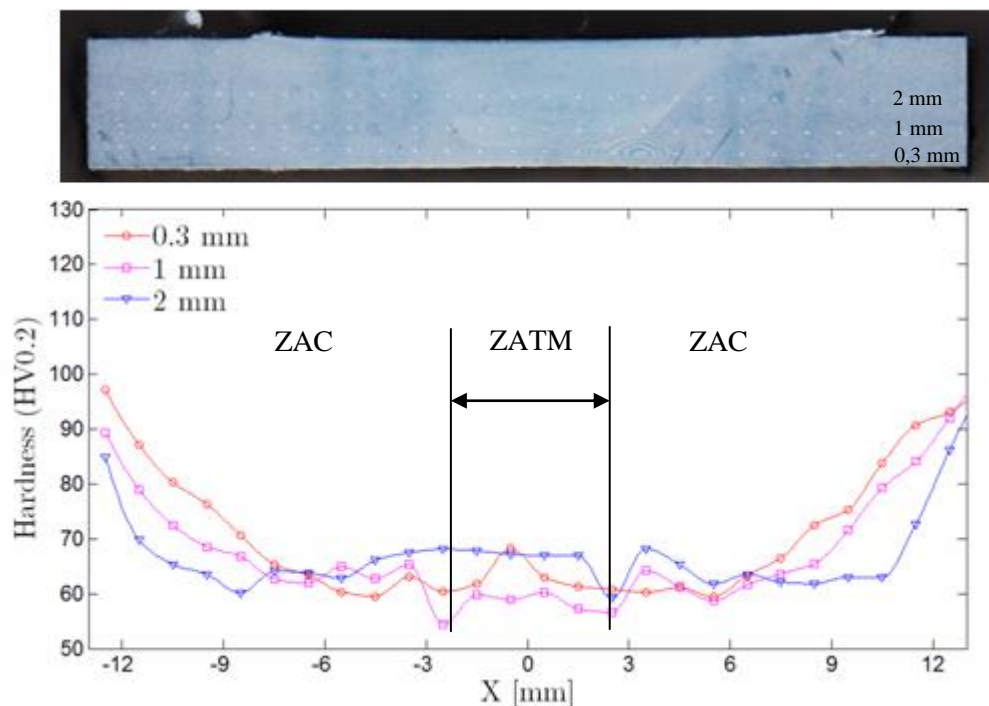


Figura 6.27- Perfis de dureza do cordão do ensaio #3 M2

Na Figura 6.28 apresenta-se uma sobreposição da linha de base (305  $\mu$ m) das amostras M2, M3, M4 e M5 do ensaio #3, visto ter sido neste ensaio que se verificaram as diferenças mais significativas no defeito na zona com e sem corrente. O objetivo desta sobreposição foi tentar perceber qual o efeito que a corrente teve ao passar pela zona da raiz do cordão (Zona de fraco fluxo visco plástico). Observando a Figura 6.28 não se notam diferenças significativas entre o perfil de dureza das zonas com e sem corrente o que significa que as propriedades mecânicas do material não foram afetadas pela passagem de corrente.

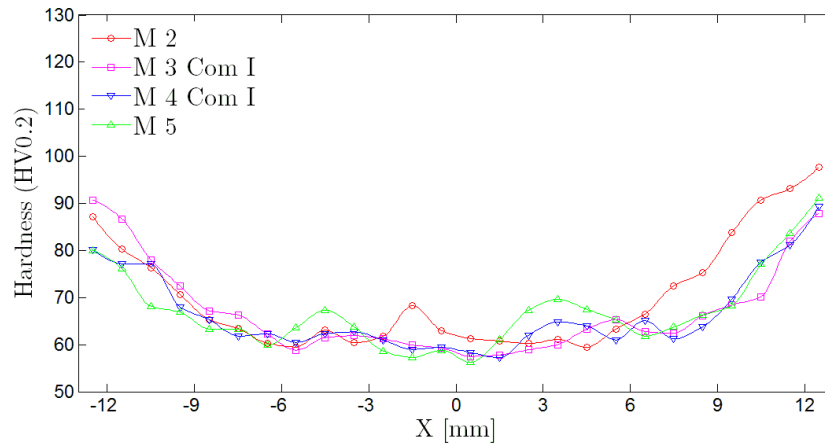


Figura 6.28- Sobreposição dos perfis de dureza das amostras M2, M3, M4 e M5 do ensaio #3

Os restantes ensaios de dureza realizados evidenciam os mesmos resultados, não se notam diferenças significativas entre os perfis de dureza das amostras com e sem passagem de corrente. Os resultados dos restantes ensaios encontram-se no anexo A5.

#### 6.3.4 Ensaios de Medição de Condutividade Elétrica

Como foi dito em § 5.7 as amostras utilizadas nos ensaios anteriores apresentavam dimensões reduzidas, obtiveram-se por isso novas amostras. Estas foram retiradas das zonas que sofreram as mesmas condições que as amostras utilizadas até então e estão indicadas nas Figuras presentes em § 6.3.1. Nos resultados apresenta-se uma imagem do perfil de condutividade obtido e a respetiva macrografia.

Na Figura 6.29 apresenta-se o perfil de condutividade da amostra M2 do ensaio #3. O perfil apresentado é um perfil característico de SFL. Neste perfil observa-se que os valores mais elevados de condutividade são registados na ZAC, este facto deve-se à coalescência de grão nesta zona, sendo o valor máximo obtido no lado em retrocesso. Na zona do *nugget* observa-se uma diminuição dos valores de condutividade, devido ao facto de nesta zona ocorrer um refinamento do grão devido à recristalização dinâmica sofrida durante o processo. Na Figura 6.29 observa-se ainda a igualdade da passagem para a esquerda com a passagem para a direita o que valida os resultados obtidos.

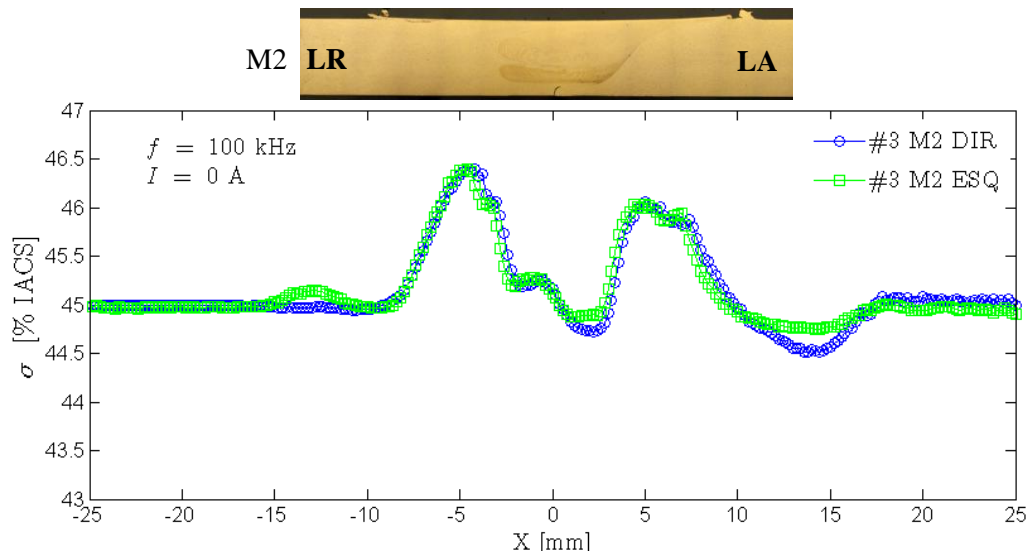


Figura 6.29- Perfil de condutividade da amostra M2 do ensaio #3

Na Figura 6.30 apresenta-se o perfil de condutividade da amostra M1 do ensaio #4 (Bob). Observa-se na figura a igualdade da passagem para a esquerda com a passagem para a direita, o que valida os resultados obtidos. Neste perfil observa-se que os valores mais elevados de condutividade são registados na ZAC, sendo o valor máximo obtido no lado em retrocesso. Na zona do *nugget* observa-se uma diminuição dos valores de condutividade, isto deve-se à ocorrência de um refinamento do grão devido à recristalização dinâmica sofrida durante o processo. O facto de a zona onde se observa uma maior condutividade ser mais estreita que na amostra anterior pode dever-se à sonda não ter passado exatamente a meio espessura e ter passado mais perto da raiz o que leva a uma zona afetada mais estreita.

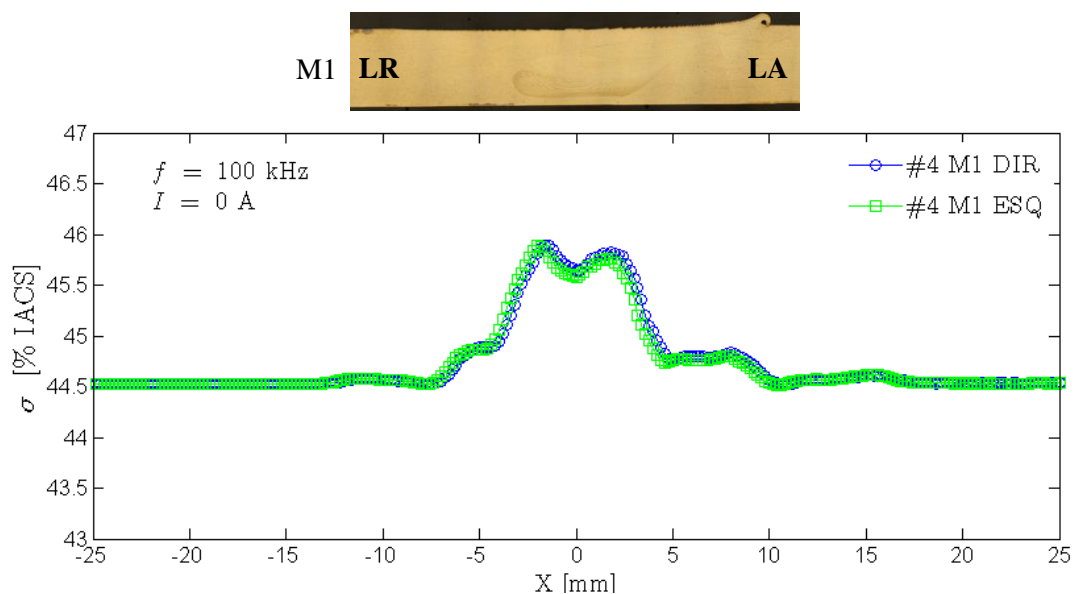


Figura 6.30- Perfil de condutividade da amostra M1 do ensaio #4



Na Figura 6.31 apresenta-se uma sobreposição do perfil de condutividade da amostra M1 e M2 do ensaio #4. Esta sobreposição teve como objetivo perceber a diferença entre a amostra retirada da zona sem passagem de corrente (M1) e da zona com passagem de corrente (M2). Os perfis resultantes não permitem concluir uma diferença entre eles. Na Figura 6.32 apresenta-se os perfis de condutividade das mesmas amostras, mas o ensaio foi feito com uma frequência diferente (250 KHz), com este ensaio confirma-se os perfis obtidos.

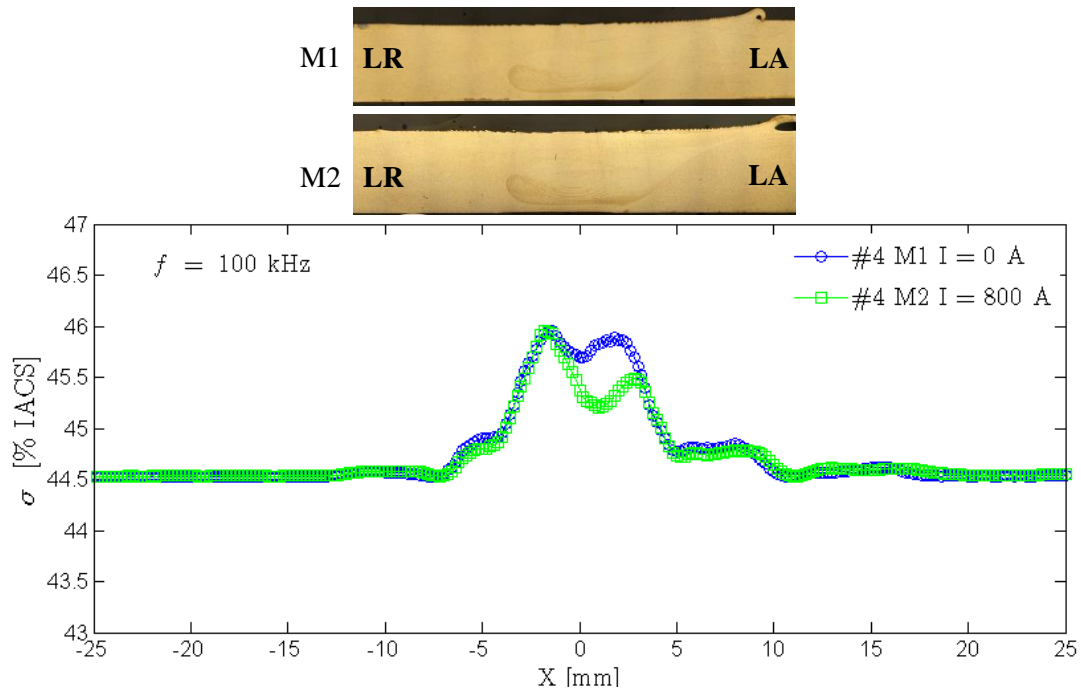


Figura 6.31- Sobreposição dos perfis de condutividade da amostra M1 e M2 do ensaio #4

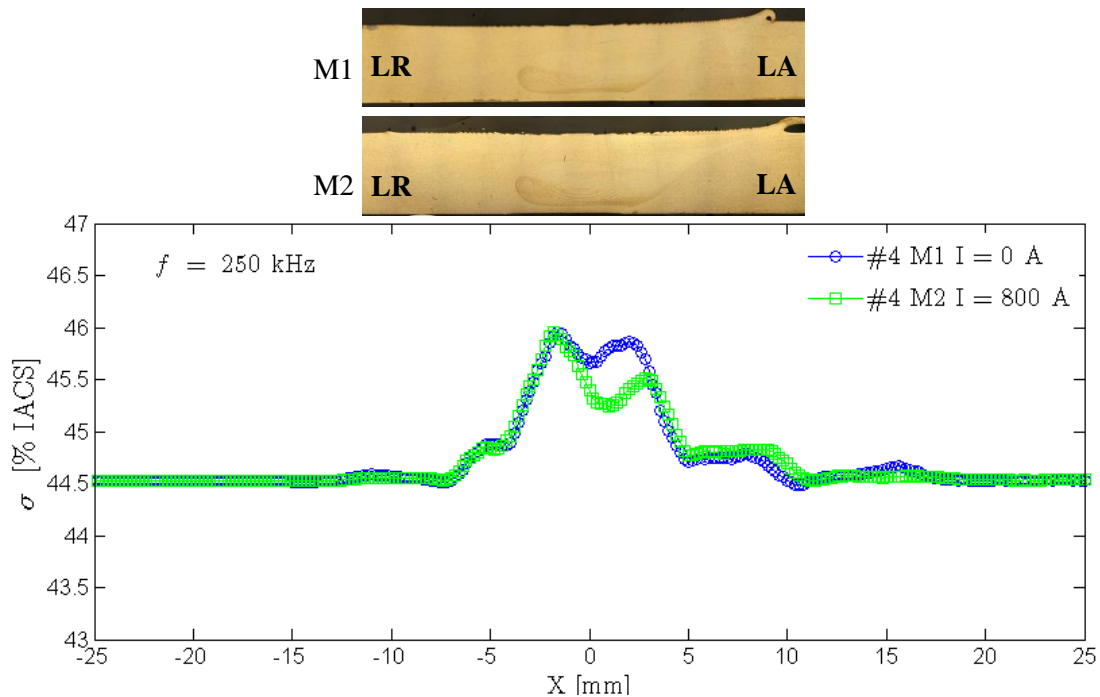


Figura 6.32- Sobreposição dos perfis de condutividade da amostra M1 e M2 do ensaio #4



Na Figura 6.33 apresenta-se uma sobreposição do perfil de condutividade da amostra M2 e M3 do ensaio #6. Este ensaio foi o único que apresentou uma diferença entre os perfis de condutividade das amostras. Na amostra retirada da zona com passagem de corrente (M3) o perfil obtido apresenta uma zona de maior condutividade com aproximadamente a mesma dimensão do diâmetro do *shoulder*. Apesar deste resultado não se observaram diferenças na análise metalográfica feita às amostras. Na Figura 6.34 e Figura 6.35 apresentam-se os perfis de condutividade da amostra M2 e M3 respectivamente. Estes ensaios foram realizados com o intuito de validar os resultados obtidos. Observa-se em ambas as figuras igualdade da passagem para a esquerda e para a direita o que valida os resultados.

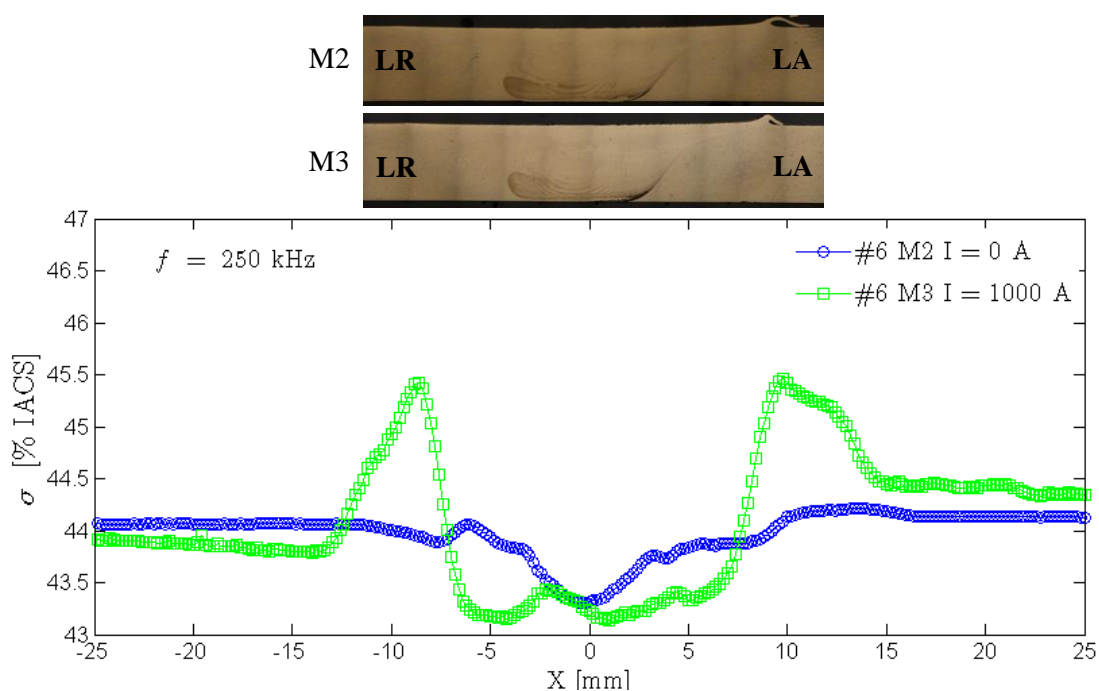


Figura 6.33- Sobreposição dos perfis de condutividade da amostra M2 e M3 do ensaio #6

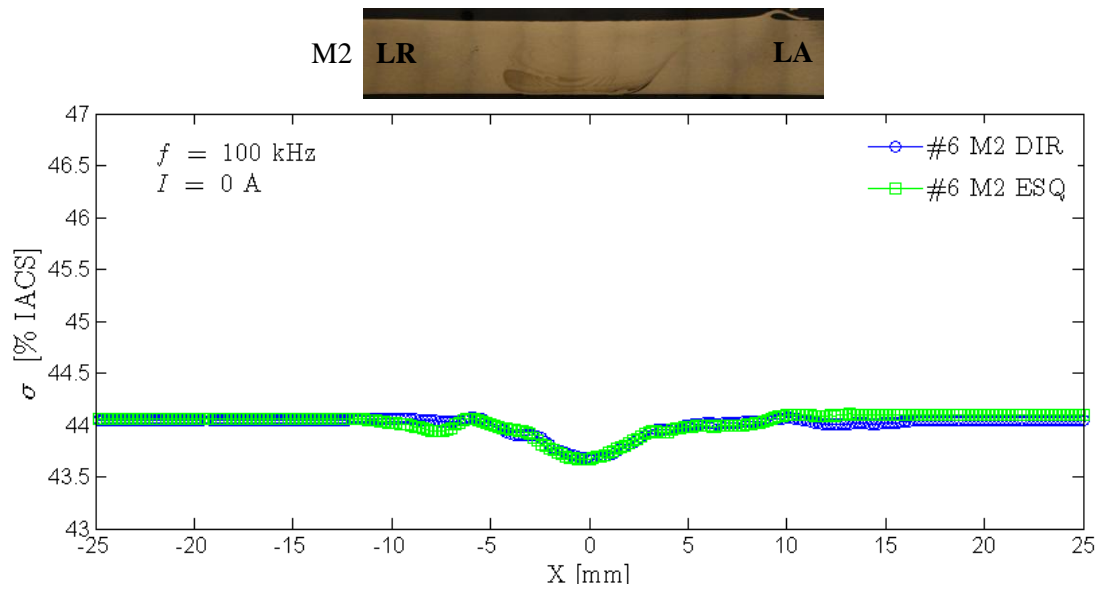


Figura 6.34- Perfil de condutividade da amostra M2 do ensaio #6

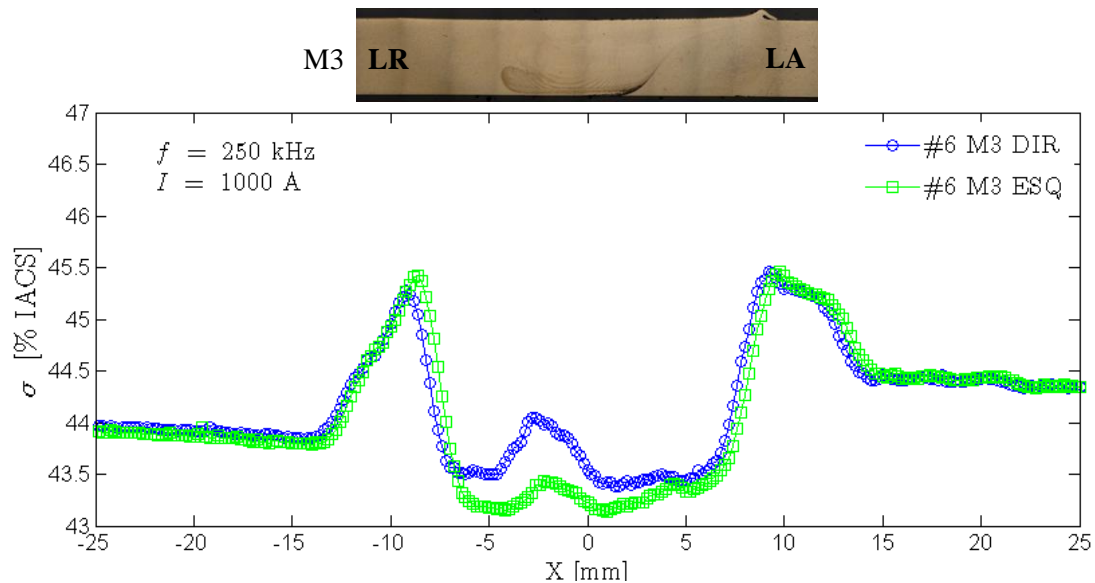


Figura 6.35- Perfil de condutividade da amostra M3 do ensaio #6

Na Figura 6.36 apresenta-se uma sobreposição do perfil de condutividade da amostra M2 e M3 do ensaio #7. Os perfis de condutividade apresentados são perfis característicos de SFL. Estes apresentam uma condutividade elevada na zona afetada pelo calor (ZAC) e na zona do *nugget* apresentam uma condutividade mais baixa. Mais uma vez não são apresentadas diferenças significativas entre os perfis das amostras retiradas da zona com e sem passagem de corrente.

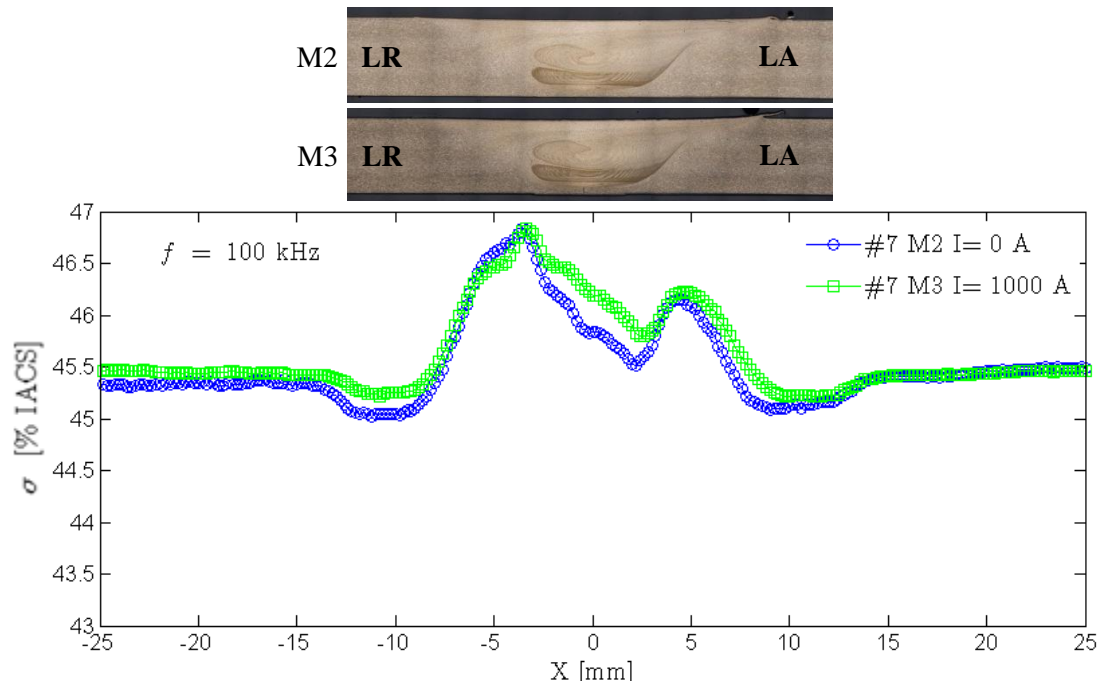


Figura 6.36- Sobreposição dos perfis de condutividade da amostra M2 e M3 do ensaio #7

Na Figura 6.37 apresentam-se os perfis de condutividade das mesmas amostras, M2 e M3 do ensaio #7 mas o ensaio foi feito com uma frequência diferente (250 KHz). Com este resultado confirma-se os perfis obtidos.

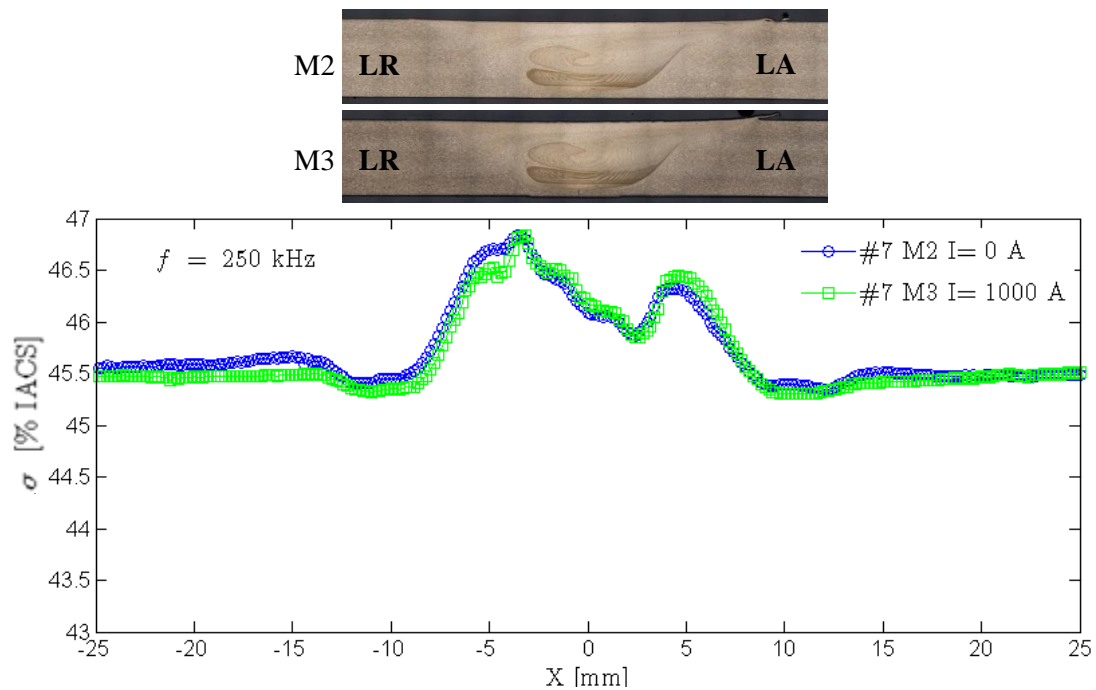


Figura 6.37- Sobreposição dos perfis de condutividade da amostra M2 e M3 do ensaio #7

## 6.4 Síntese do Capítulo

Neste capítulo apresentaram-se os resultados dos ensaios realizados, primeiramente os ensaios preliminares com material de sacrifício seguidos dos ensaios de SFLAE.

Os ensaios preliminares com material de sacrifício não mostraram ser um procedimento viável. Os materiais de sacrifício utilizados não apresentaram resistência suficiente para suportar o processo e em nenhum dos ensaios se verificou a eliminação do defeito.

Os ensaios de SFLAE não mostraram redução ou eliminação dos defeitos na raiz do cordão exceto num dos ensaios (ensaio #3).

Os resultados da análise metalográfica e ensaios de dureza não evidenciaram alterações metalúrgicas entre as amostras retiradas das zonas com e sem passagem de corrente.

Os resultados dos ensaios de condutividade elétrica não evidenciam diferenças significativas entre os perfis de condutividade obtidos das amostras das zonas com passagem de corrente e sem passagem de corrente.

## 7 Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

### 7.1 Conclusões

Do trabalho realizado foi possível concluir o seguinte:

- 1) Os ensaios experimentais referentes às metodologias para eliminação do defeito na raiz da Soldadura por Fricção Linear (SFL), com base na utilização de uma base de sacrifício, mostraram que o procedimento não é viável, pelo menos, para os materiais testados. Em todos os casos se verificou uma das seguintes situações: i) abatimento da junta soldada por falta de resistência do material de sacrifício, ii) união do material a soldar com o material de sacrifício, iii) introdução de partículas de material de sacrifício no material a soldar.
- 2) O modelo analítico desenvolvido para simular o processo de SFL assistida por corrente elétrica permitiu validar o conceito para intensidades de corrente elétrica da ordem de 800 A, já que para estes valores se consegue um aumento de temperatura do material a soldar da ordem dos 200-300 °C.
- 3) A simulação numérica com o Método dos Elementos Finitos permitiu compreender a distribuição da densidade de corrente elétrica na ferramenta de soldadura e no material a soldar. De acordo com os resultados desta simulação a corrente elétrica está confinada sobretudo na zona da alma de cobre do pino da ferramenta.
- 4) O protótipo funcional desenvolvido, após algumas alterações, cumpriu os requisitos inicialmente estabelecidos, tendo permitido a circulação de corrente elétrica com intensidades superiores a 1000 A. A instrumentação e o *software* de aquisição e apresentação de dados também satisfizeram as necessidades envolvidas nos ensaios experimentais.
- 5) A utilização de corrente elétrica para assistir o processo de SFL apenas mostrou uma redução significativa e evidente dos defeitos em um dos ensaios realizados. Para os restantes ensaios, mesmo utilizando intensidades de corrente superiores a 1000 A, os resultados da análise metalográfica não permitem identificar melhorias significativas na redução dos defeitos na raiz dos cordões. Por outro lado, os resultados das medições de microdureza não evidenciaram alterações metalúrgicas devido ao efeito de Joule.
- 6) A explicação para estes resultados poderá estar relacionada com o facto de a corrente elétrica não estar confinada apenas à alma do pino em cobre, circulando também através do *shoulder* da ferramenta. Deste modo, a densidade de corrente abrange toda a espessura da chapa e toda a área do *shoulder*, provocando uma redução drástica do calor gerado por efeito de Joule na zona da raiz do cordão.

## 7.2 Desenvolvimentos Futuros

Tendo em conta o conhecimento processual adquirido com a realização deste trabalho, propõem-se para desenvolvimento futuro:

- 1) Conceber um novo corpo e um novo *shoulder* da ferramenta para que possa ser produzido em material cerâmico, por forma a garantir o total confinamento da corrente elétrica ao núcleo de cobre do pino.
- 2) Realizar mais ensaios experimentais com a nova ferramenta, usando diferentes ligas de alumínio e variando os parâmetros do processo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] “TWI - Manufacturing, engineering, materials and join specialists.” [Online]. Available: [www.twi.co.uk](http://www.twi.co.uk). [Acedido em Novembro 2012]
- [2] R. S. Mishra and Z. Y. Ma, “Friction stir welding and processing,” *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 50, no. 1–2, pp. 1–78, Aug. 2005.
- [3] F. Zhi-hong, H. Di-qiu, and W. Hong, “Friction Stir Welding of Aluminum Alloys,” *Journal of Wuhan University of Technology-Mater.Sci.Ed*, vol. 19, no. 1, 2004.
- [4] W. M. U. Thomas, E. D. Nicholas, A. Hall, and C. Cb, “Friction stir welding for the transportation industries,” *Materials & Design*, vol. 18, pp. 269–273, 1998.
- [5] H. S. Arora, “FRICTION STIR WELDING - TECHNOLOGY AND FUTURE,” pp. 32–38, 2010.
- [6] S. W. Kallee, J. Davenport, and E. D. Nicholas, “Railway rolling stock manufacturers implement friction stir welding,” *Welding Journal*, 2002. [Online]. Available: <http://www.twi.co.uk/technical-knowledge/published-papers/railway-rolling-stock-manufacturers-implement-friction-stir-welding-october-2002/>. [Acedido em Novembro de 2012]
- [7] “Space Shuttle Technology Summary Friction Stir Welding,” January, 2005.
- [8] F. Delany, S. W. Kallee, and M. J. Russell, “Friction stir welding of aluminium ships,” *International Forum on Welding Technologies in the Shipping Industry*, 2007. [Online]. Available: <http://www.twi.co.uk/technical-knowledge/published-papers/friction-stir-welding-of-aluminium-ships-june-2007/?locale=en>. [Acedido em Novembro 2012]
- [9] A. J. Leonard and S. A. Lockyer, “FLAWS IN FRICTION STIR WELDS,” pp. 14–16, 2003.
- [10] J. F. O. Santos and L. Quintino, *Processos de Soldadura*, 2ª Edição. Edições Técnicas ISQ, 1998.
- [11] S.-W. Song, B.-C. Kim, T.-J. Yoon, N.-K. Kim, I.-B. Kim, and C.-Y. Kang, “Effect of Welding Parameters on Weld Formation and Mechanical Properties in Dissimilar Al Alloy Joints by FSW,” *Materials Transactions*, vol. 51, no. 7, pp. 1319–1325, 2010.
- [12] J. Guo, P. Gougeon, and X.-G. Chen, “Microstructure evolution and mechanical properties of dissimilar friction stir welded joints between AA1100-B4C MMC and AA6063 alloy,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 553, pp. 149–156, Sep. 2012.
- [13] P. Liu, Q. Shi, W. Wang, X. Wang, and Z. Zhang, “Microstructure and XRD analysis of FSW joints for copper T2/aluminium 5A06 dissimilar materials,” *Materials Letters*, vol. 62, no. 25, pp. 4106–4108, Sep. 2008.

- [14] U. Dressler, G. Biallas, and U. Alfaro Mercado, "Friction stir welding of titanium alloy TiAl6V4 to aluminium alloy AA2024-T3," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 526, no. 1–2, pp. 113–117, Nov. 2009.
- [15] R. S. Coelho, a. Kostka, J. F. dos Santos, and a. Kaysser-Pyzalla, "Friction-stir dissimilar welding of aluminium alloy to high strength steels: Mechanical properties and their relation to microstructure," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 556, pp. 175–183, Oct. 2012.
- [16] M. Senmweldi and C. Metals, "Advances in tooling material for friction stir welding," *TWI ltd*, pp. 1–11, 1991.
- [17] R. Nandan, T. Debroy, and H. Bhadeshia, "Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties," *Progress in Materials Science*, vol. 53, no. 6, pp. 980–1023, Aug. 2008.
- [18] B. W. M. Thomas, I. M. Norris, D. G. Staines, and E. R. Watts, "Friction Stir Welding – Process Developments and Variant Techniques," *The SME Summit 2005*, pp. 1–21, 2005.
- [19] W. M. Thomas, D. G. Staines, E. R. Watts, and I. M. Norris, "The simultaneous use of two or more friction stir welding tools Twin-stir™ techniques," *TWI ltd*, no. 3, pp. 2–7, 2005.
- [20] D. Lammlein, N. Trepal, M. Posada, and A. Floyd, "Defect Significance and Detection in Aluminum Friction Stir Welds : A Literature Search," *Naval Surface Warfare Centes Carderock Division*, 2011.
- [21] T. Dickerson, "Fatigue of friction stir welds in aluminium alloys that contain root flaws," *International Journal of Fatigue*, vol. 25, no. 12, pp. 1399–1409, Dec. 2003.
- [22] C. Zhou, X. Yang, and G. Luan, "Fatigue properties of friction stir welds in Al 5083 alloy," *Scripta Materialia*, vol. 53, no. 10, pp. 1187–1191, Nov. 2005.
- [23] C. Zhou, X. Yang, and G. Luan, "Effect of root flaws on the fatigue property of friction stir welds in 2024-T3 aluminum alloys," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 418, no. 1–2, pp. 155–160, Feb. 2006.
- [24] S. Di, X. Yang, D. Fang, and G. Luan, "The influence of zigzag-curve defect on the fatigue properties of friction stir welds in 7075-T6 Al alloy," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 104, no. 2–3, pp. 244–248, Aug. 2007.
- [25] T. Vugrin, F. Beckmann, T. Donath, J. Fischer, and A. Schreyer, "Investigation of Root Flaws in Friction Stir Welds," pp. 407–408, 1991.
- [26] T. G. Santos, "Ensaio Não Destrutivos por Correntes Induzidas: Desenvolvimento e Aplicação à Soldadura por Fricção Linear," Lisboa: Tese de Doutoramento - IST, 2009.
- [27] E. A. C. Andrade, "Desenvolvimento de Ferramenta Bobbin-Tool para o Processo de Soldadura por Fricção Linear Caracterização e Análise da Liga de alumínio AA6061-T4," Lisboa: Tese de Mestrado - IST, 2009.



- [28] “The use of bobbin tools for friction stir welding of aluminium alloys.” [Online]. Available: <http://www.twi.co.uk/technical-knowledge/published-papers/the-use-of-bobbin-tools-for-friction-stir-welding-of-aluminium-alloys-august-2009/>. [Acedido em Novembro 2012]
- [29] W. M. Thomas, C. S. Wiesner, D. J. Marks, and D. G. Staines, “Conventional and bobbin friction stir welding of 12% chromium alloy steel using composite refractory tool materials,” *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 14, no. 3, pp. 247–253, Apr. 2009.
- [30] J. Hilgert, “Knowledge Based Process Development of Bobbin Tool Friction Stir Welding,” Tese de Doutorado, 2012.
- [31] R. J. Ding and P. A. Oelgoetz, “AUTO-ADJUSTABLE PIN TOOL FOR FRICTION STIR WELDING,” U.S. Patent 5,893,507.
- [32] J. Mai, L. Peng, X. Lai, and Z. Lin, “Electrical-assisted embossing process for fabrication of micro-channels on 316L stainless steel plate,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 213, pp. 314–321, 2013.
- [33] Z. Zimniak and G. Radkiewicz, “The electroplastic effect in the cold-drawing of copper wires for the automotive industry,” *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 8, no. 2, pp. 173–179, Jan. 2008.
- [34] W. A. Ferrando, “The concept of Electrically assisted friction stir welding (EAFSW) and application to the Processing of various Metals,” *Naval Surface Warfare Centes Carderock Division*, 2008.
- [35] W. A. Ferrando, “electrically assisted FSW,” U.S. Patent US 8,164,021 B12012.
- [36] “MatWeb.” [Online]. Available: <http://www.matweb.com/>. [Acedido em Dezembro 2012]
- [37] T. J. G. Santos and P. M. dos S. V. Silva, “Sistema Modular Dual de Ferramenta para Soldadura e Processamento por Fricção Linear.” [Online]. Available: [https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/284109/1/Patente%20iStir\\_v2.pdf](https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/284109/1/Patente%20iStir_v2.pdf) [Acedido em Dezembro de 2012]
- [38] “Olympus.” [Online]. Available: <http://www.olympus-ims.com/pt/>. [Acedido em Fevereiro de 2013]
- [39] G. E. P. Almeida, “Simulação Numérica e Avaliação Experimental do Desempenho de Sondas Inovadoras de Correntes Induzidas em Diferentes Materiais e Defeitos,” Lisboa: Tese de Mestrado - FCT, UNL 2012.



## **ANEXOS:**

## A1-Transdutor Amperimétrico LEM LA 200-P/SP1

### Tecnologia:

O transdutor amperimétrico LEM LA 200-P/SP1 funciona com base no efeito de Hall, com a tecnologia *closed loop*. O fluxo magnético criado pela corrente elétrica primária é equilibrado por um fluxo complementar pela corrente proveniente da alimentação que passa nos enrolamentos secundários. Um dispositivo de Hall e um circuito eletrônico são usados para gerar a corrente secundária (de compensação) que é uma exata representação da corrente primária que está a passar nesse instante no sensor. O sinal de saída (*output*) tem uma relação de 1:200 da corrente de entrada e é dada por meio de uma tensão de saída e uma resistência de medição cujos valores máximos e mínimos para cada caso estão descritos na tabela de especificações elétricas. A partir destes valores calcula-se o valor da corrente de saída.

As especificações elétricas estão descritas na Tabela A.1e na Figura A.1 apresenta-se o esquema elétrico do transdutor.

Tabela A.1- Especificações elétrica do transdutor amperimétrico LEM LA 200P/SP1

$I_{PN}$	Corrente primária nominal (rms)	200 A			
$I_{PM}$	Corrente primária (intervalo de valores)	0 ..± 300 A			
$I_{SN}$	Corrente secundária nominal (rms)	100 mA			
$K_N$	Taxa de conversão	1 : 200			
$V_C$	Alimentação (±5%)	± 12.. 15 V			
				$R_{M \min} (\Omega)$	$R_{M \max} (\Omega)$
$R_M$	Resistência de medição	Com 12V	@ ± 200A <sub>max</sub>	30	0
			@ ± 250A <sub>max</sub>	8	0
		Com 15V	@ ± 200A <sub>max</sub>	60	0
			@ ± 300A <sub>max</sub>	12	0

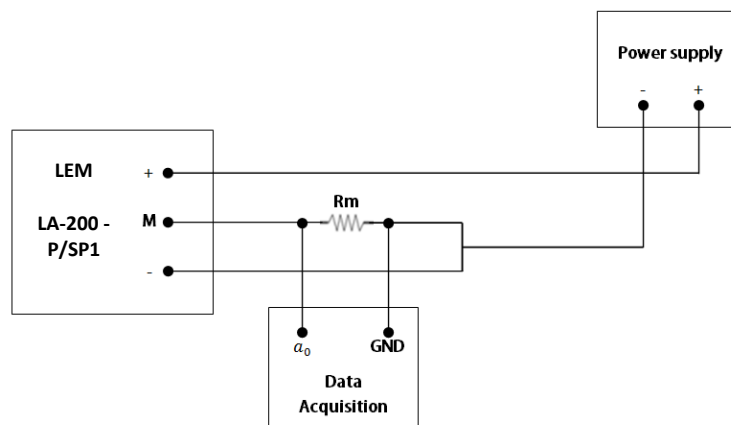


Figura A.1- Esquema de ligações elétricas do Transdutor LEM LA - 200P/ SP1

## A2-Transdutor Amperimétrico LEM LF 1005-S

### Tecnologia:

O transdutor amperimétrico LEM LF 1005-s funciona com base no efeito de Hall, com a tecnologia *closed loop*. O fluxo magnético criado pela corrente elétrica primária é equilibrado por um fluxo complementar pela corrente proveniente da alimentação que passa nos enrolamentos secundários. Um dispositivo de Hall e um circuito eletrónico são usados para gerar a corrente secundária (de compensação) que é uma exata representação da corrente primária que está a passar nesse instante no sensor. O sinal de saída (*output*) tem uma relação de 1:5000 da corrente de entrada e é dada por meio de uma tensão de saída e uma resistência de medição cujos valores máximos e mínimos para cada caso estão descritos na tabela de especificações elétricas. A partir destes valores calcula-se o valor da corrente de saída.

As especificações elétricas estão descritas na Tabela A.2 e na Figura A.2 apresenta-se o esquema elétrico do transdutor.

Tabela A.2- Especificações elétrica do transdutor amperimétrico LEM LF 1005-s

$I_{PN}$	Corrente primária nominal (rms)	1000 A			
$I_{PM}$	Corrente primária (intervalo de valores)	0 ..±1500 A			
$I_{SN}$	Corrente secundária nominal (rms)	200 mA			
$K_N$	Taxa de conversão	1 : 5000			
$V_C$	Alimentação (±5%)	± 15.. 24 V			
				$R_{M \min} (\Omega)$	$R_{M \max} (\Omega)$
$R_M$	Resistência de medição	Com 15V	@ ± 1000A <sub>max</sub>	0	18
			@ ± 1200A <sub>max</sub>	0	7
		Com 24V	@ ± 1000A <sub>max</sub>	5	60.5
			@ ± 1500A <sub>max</sub>	5	24

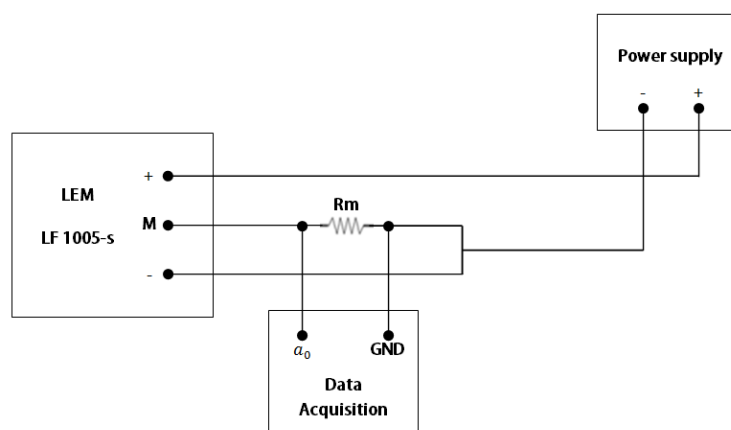


Figura A.2- Esquema de ligações elétricas do Transdutor LEM LF 1005-s

## A3-Transdutor Amperimétrico LEM HTA 400-s

### Tecnologia

O transdutor amperimétrico LEM HTA 400-s funciona com base no efeito de Hall, com a tecnologia *open loop*. O fluxo magnético criado pela corrente elétrica primária é concentrado num circuito magnético e medido no espaço vazio usando um dispositivo de Hall. O sinal de saída (*Output*) do dispositivo de Hall é um sinal que fornece uma exata representação de corrente primária que está a passar nesse instante no sensor. O sinal de saída neste sensor é dado por uma tensão de saída que é corresponde à relação de 1:100 da corrente de primária que passa pelo sensor.

As especificações elétricas estão descritas na Tabela A.3e na Figura A.3apresenta-se o esquema elétrico do transdutor.

Tabela A.3- Especificações elétricas do transdutor amperimétrico LEM HTA 400-s

$I_{PN}$	Corrente primária nominal (rms)	400 A
$I_{PM}$	Corrente primária (intervalo de valores)	0 ..±1000 A
$V_C$	Alimentação	± 15 V

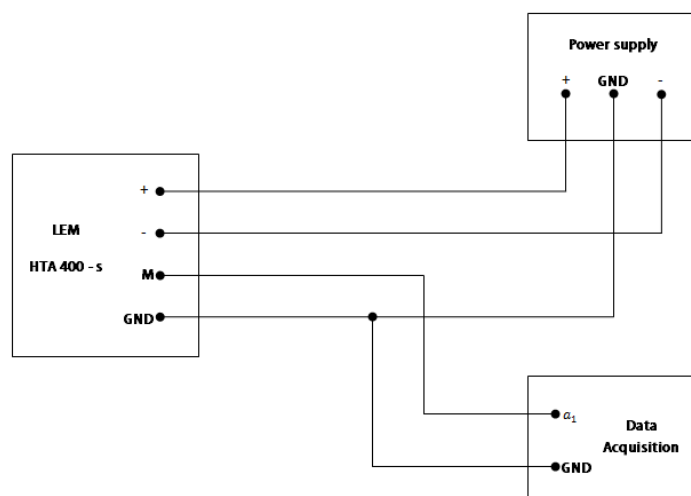


Figura A.3- Esquema de ligações elétricas do Transdutor LEM HTA 400-s

## A4- Código LabVIEW2012

### A4.1- Diagrama de Blocos

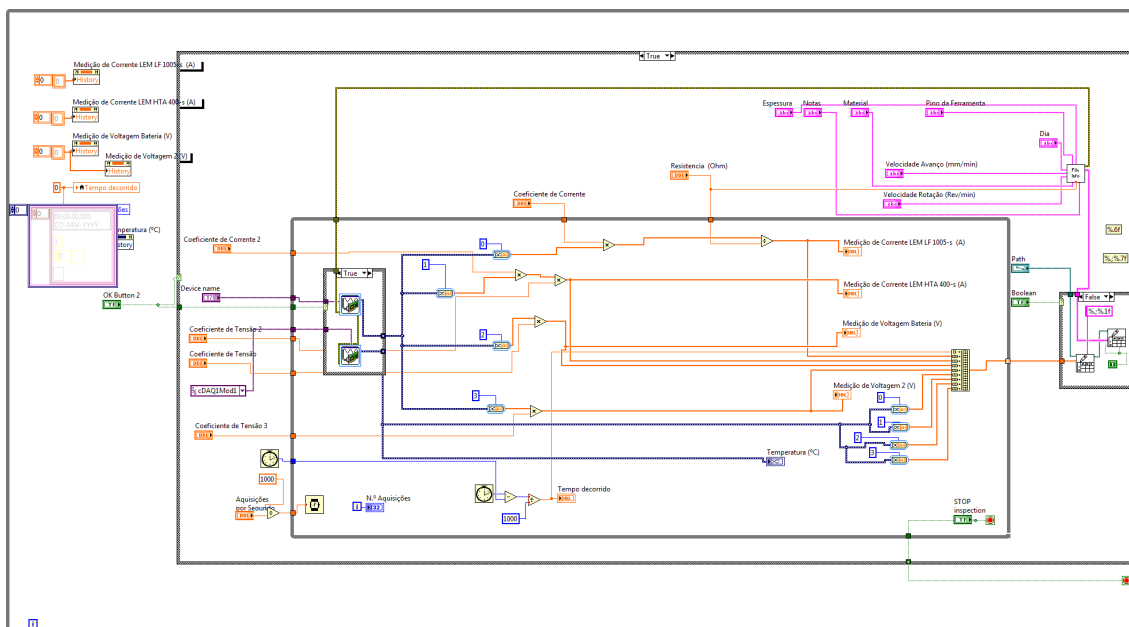


Figura A.4- Diagrama de blocos do código Labview do programa de aquisição de dados

### A4.2- Dados Gerados

```
184.4  1.9  0.4  12.6  0.1  45.5  47.3  47.2  44.0
185.6  1.9  0.4  12.6  0.0  45.4  47.2  47.1  43.9
186.9  1.9  0.4  12.6  0.1  45.3  47.1  46.9  43.8
```

```
----- t(s)  I1(A)  I2(A)  BAT(V)  V2 (V)  T1 (°C)  T2 (°C)  T3 (°C)  T4(°C) -----
```

```
----- Parametros do Ensaio -----
```

```

Dia :
velocidade Avanço (mm/min):
velocidade Rotação (Rev/min):
Base da Ferramenta :
Pino da Ferramenta :
Material :
X Displac :
Resistencia :
Resistencia 2 :
Notas :

```

Figura A.5- Parte do ficheiro \*.txt gerado pelo Software de aquisição de dados



## A5- Resultados dos Ensaios de Dureza

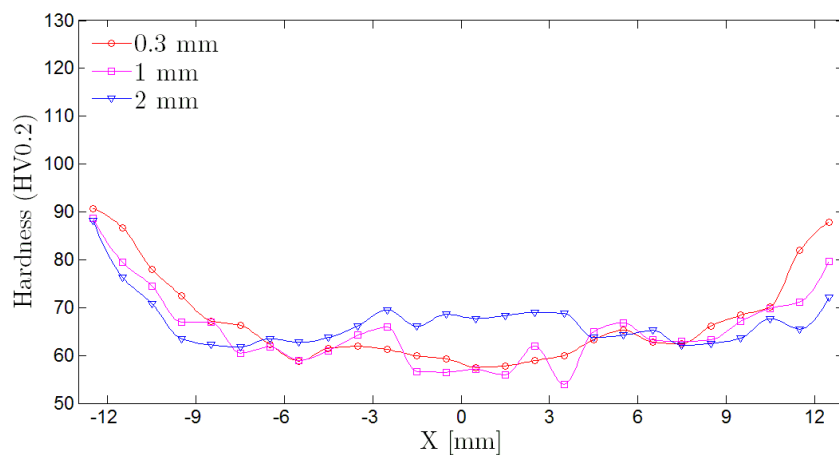


Figura A.6- Perfil de dureza do cordão de soldadura da amostra M3 do ensaio #3

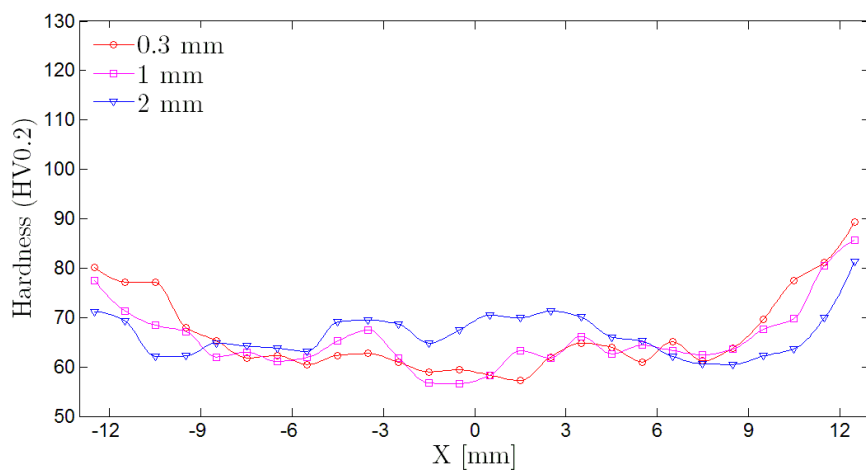


Figura A.7- Perfil de dureza do cordão de soldadura da amostra M4 do ensaio #3

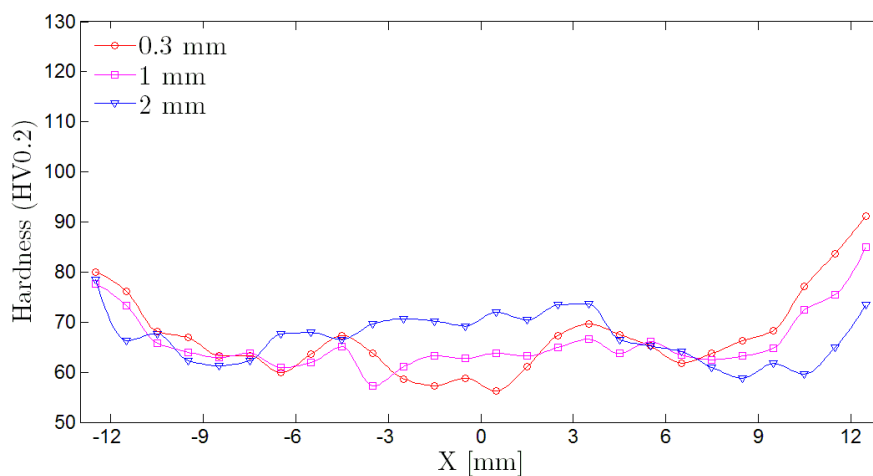


Figura A.8- Perfil de dureza do cordão de soldadura da amostra M5 do ensaio #3

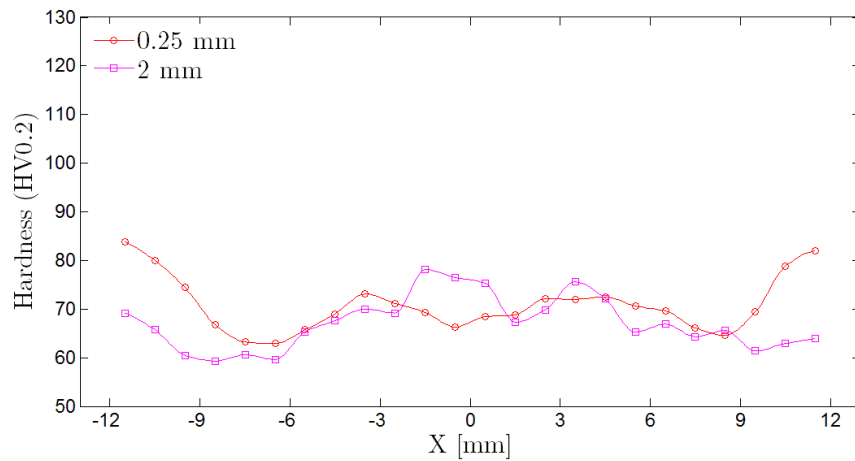


Figura A.9- Perfil de dureza do cordão de soldadura da amostra M1 do ensaio #4

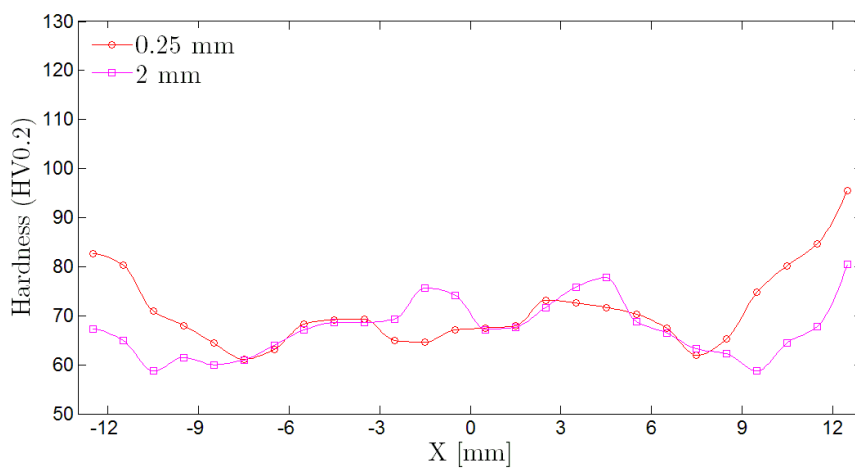


Figura A.10- Perfil de dureza do cordão de soldadura da amostra M2 do ensaio #4

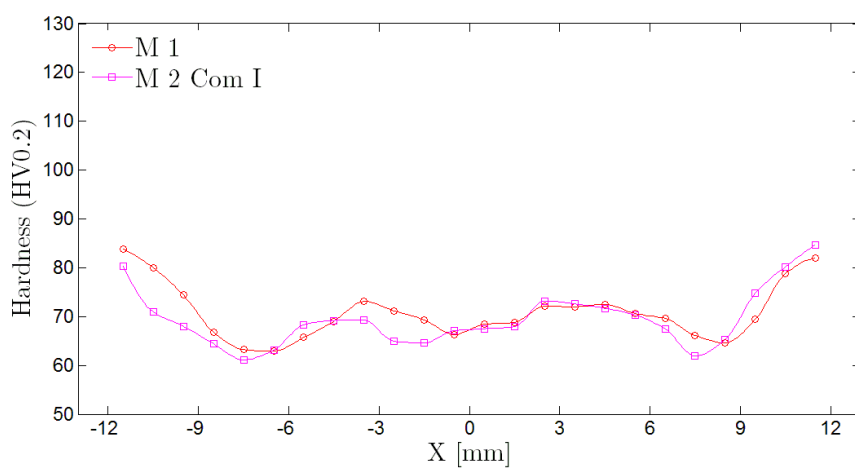


Figura A.11- Sobreposição dos perfis de dureza das amostras M1 e M2 do ensaio #4

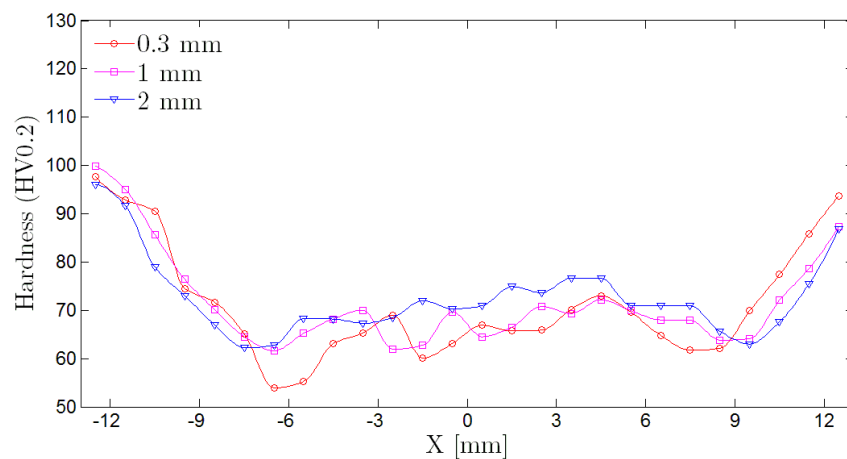


Figura A.12- Perfil de dureza do cordão de soldadura da amostra M2 do ensaio #6

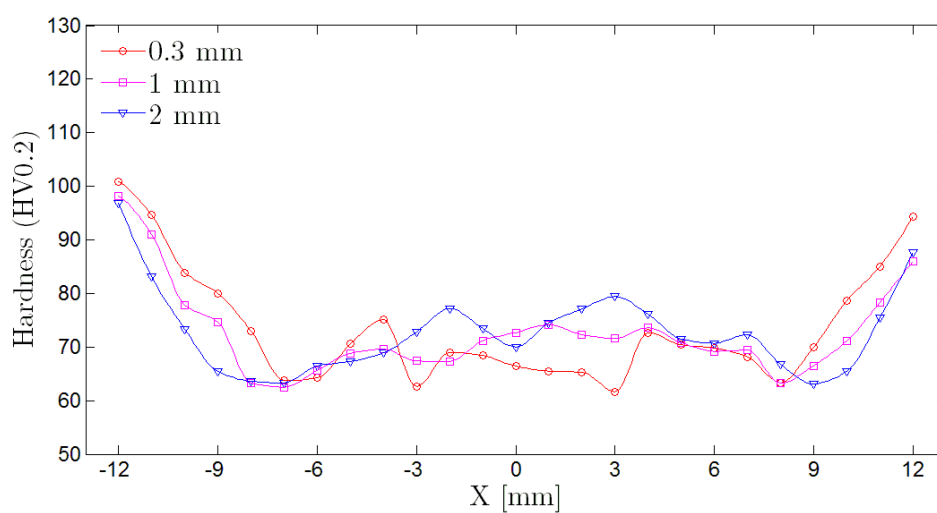


Figura A.13- Perfil de dureza do cordão de soldadura da amostra M3 do ensaio #6

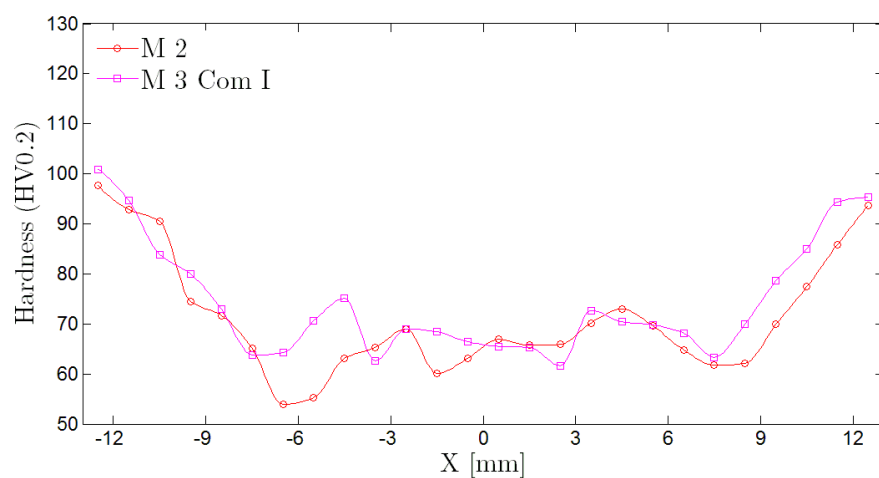


Figura A.14- Sobreposição dos perfis de dureza das amostras M2 e M3 do ensaio #6

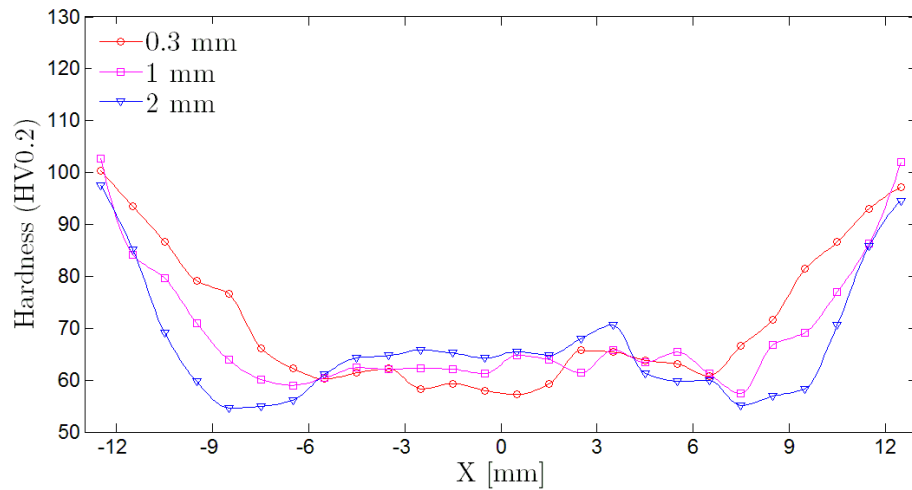


Figura A.15- Perfil de dureza do cordão de soldadura da amostra M2 do ensaio #7

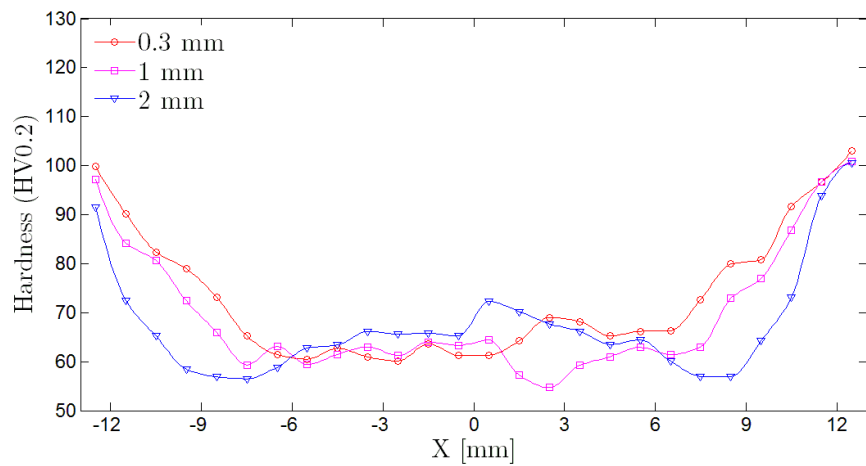


Figura A.16- Perfil de dureza do cordão de soldadura da amostra M3 do ensaio #7

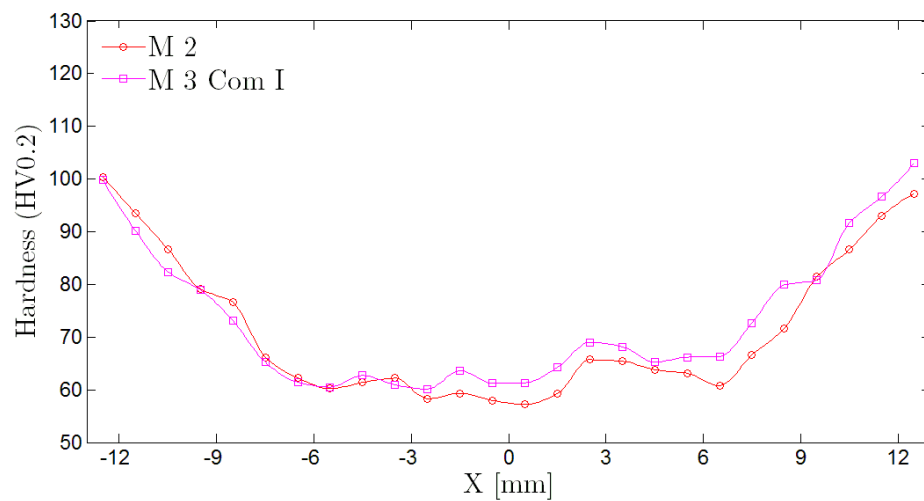


Figura A.17- Sobreposição dos perfis de dureza das amostras M2 e M3 do ensaio #7